

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. Бабаков, 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) 557-21-92
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать:
31.01.2017 г.

Отпечатано:

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

Формат 60х90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 59

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Козловский В.Н., Новикова А.П., Блинов Н.И.

Тенденции развития электрооборудования современных автомобилей и актуализация задачи по разработке системы мониторинга комплекса электроснабжения 2

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С.

Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока 5

Иньков Ю.М., Сачкова Е.В.

Стабильность выходного напряжения преобразователя частоты системы централизованного электроснабжения поездов 11

Веселов П.А.

К вопросу применения имитационных моделей движения для исследования эффективности рекуперативного торможения в метрополитенах 16

Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А.

Перспективы применения многофазных машин переменного тока 19

Гурова Е.Г., Макаров С.В., Дегтяренко А.В., Панченко Ю.В.

Математическое описание и моделирование виброизолирующего устройства с неодимовым компенсатором жесткости 27

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Конохов Д.В., Иньков Ю.М.

Совершенствование системы управления тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза 30

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ

Ляной В.В.

Индуктивные датчики регистрации прохода колеса железнодорожной подвижной единицы. Проблемы и перспективы использования. 37

ИНФОРМАЦИЯ

Краснов Л.А.

О критериях отнесения продукции радиоэлектроники к промышленной продукции, не имеющей аналогов, произведенных в Российской Федерации 43

Краснов Л.А.

О внесении изменения в Гражданский кодекс РФ 44

Перечень статей, напечатанных в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» в 2016 году 45

Тенденции развития электрооборудования современных автомобилей и актуализация задачи по разработке системы мониторинга комплекса электроснабжения

// Advanced automobiles electric equipment development trends and power supply monitoring system development update //

Козловский В.Н., д.т.н.,
Новикова А.П., Блинов Н.И.,
СамГТУ, г. Самара

В работе представлены результаты анализа конструкторско-технологического развития электрооборудования автомобилей за последние десять лет с актуализацией задачи совершенствования бортового мониторинга работоспособности и диагностики неисправностей комплекса электроснабжения. Ключевые слова: автомобиль, электро-мобиль, автомобиль с комбинированной энергоустановкой, электрооборудование, электроснабжение, диагностика работоспособности.

In work represents results of design and technology development of automobile electric equipment for last ten years, with actualization of onboard monitoring system performance update and electric equipment multifunction diagnostic. Keywords: automobile, electric car, automobile with a combined powerplant, electric equipment, electric power supply, performance diagnostics.

Тенденции развития мировой автомобильной промышленности сегодня обусловлены рядом факторов, ключевым образом влияющих на проектно-технологический облик современных автотранспортных средств [1, 2]:

- ужесточение конкуренции требует от автопроизводителей решений, связанных с оптимизацией цены и качества новых продуктов;
- повышается роль инновационной составляющей компонентной базы автомобилей как одной из основных в формировании потребительских свойств продуктов;
- системное ужесточение экологических норм и требований по безопасности вынуждает автопроизводителей развивать соответствующие технологии.

Все вышеизложенное обеспечивает развитие новых направлений автотранспортной тематики, связанных с активной интеграцией в автомобильный транспорт новых компонентов электрооборудования и электроники. В перспективе это приведет к замещению целого ряда автомобильных систем соответствующим электрооборудованием [2], а комплекс бортового электрооборудования автомобиля превратится в наиболее значимый комплекс АТС (рис. 1).

Рассматривая следствия ужесточения экологических норм, можно сказать, что на передний план для АТС выходят тенденции уменьшения вредных выбросов в окружающую среду, а также непосредственного сжигания кислорода. Одним из решений в этом вопросе является совершенствование конструкций и рабочих процессов ДВС с применением комплексных электронных систем управления и нейтрализации отработанных газов. В этом направлении при

поддержке государства устанавливаются различные нормативы и стандарты, удерживающие применение расходного топлива в определенном коридоре. Так, за время действия стандартов «Евро» с 1993 года количество вредных веществ в отработанных газах (ОГ) от автомобилей с ДВС снизилось более чем в два раза. Всего за последние 40 лет содержание токсичных компонентов в ОГ одного автомобиля уменьшилось на 70%.

Другим решением поставленной задачи служат разработка, применение и внедрение элементов альтернативной энергетики в автомобильной промышленности. Одной из дальних перспектив развития применения такого рода альтернатив становится водород, запасы которого практически не ограничены. К тому же по экологическим показателям автомобили с водородными двигателями имеют лидирующие позиции, благодаря чему может быть решена проблема токсичности отработанных газов, поскольку в результате сгорания водорода образуется вода. Однако применение водорода сопряжено с энергетическими и экономическими затратами на хранение, транспортировку и использование. На сегод-

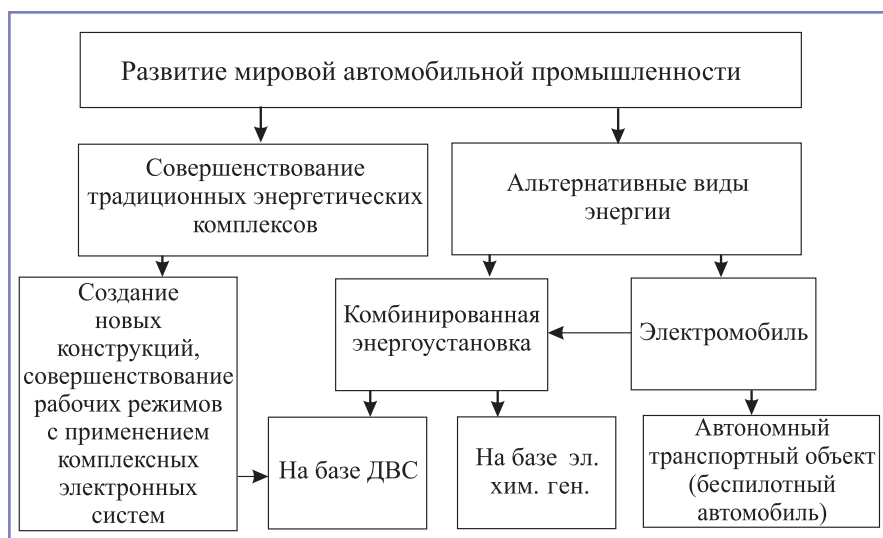


Рис. 1. Тенденции развития современной автомобильной промышленности

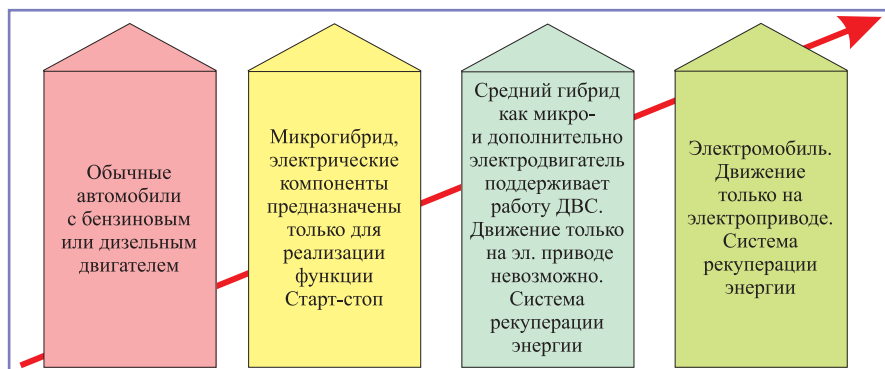


Рис. 2. Необходимость внедрения электротехнической системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТС

няшний день состояние вопроса таково, что говорить о скором применении водородного не представляется возможным.

Конструкторско-технологический скачок в сфере технологии в области разработок высокоэнергетических материалов (рис. 2), используемых в качестве тяговых батарей (ТАБ) и тяговых электродвигателей (ТЭ), привел к созданию экологически безопасного городского бесшумного транспорта – перспективных электромобилей (ЭМБ) и автомобилей с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ). Развитие технологий в вопросах проектирования, производства, а также разработок применения солнечных батарей в автомобильной промышленности, быстрый рост электронных систем управления, в том числе дистанционных в виде систем GPS и ГЛОНАСС, способствуют созданию инновационного продукта – автономного транспортного объекта (АТО) или беспилотного автомобиля [2].

Разработка беспилотных автомобилей уже не первый год является актуальной проблемой в автомобильной отрасли. Над созданием полностью автономных машин работают Volkswagen, General Motors, Toyota, Daimler, Volvo, BMW и другие крупнейшие мировые концерны. В России подобные технологии наиболее активно развивает КамАЗ. В 2015 году этот производитель грузовиков объявил о разработке беспилотного самосвала, а в 2016 году партнер КамАЗа – компания Cognitive Technologies – испытала на полях Татарстана прототип беспилотного трактора. Помимо КамАЗа, в дорожной карте фигурируют и другие крупные российские производители: группа ГАЗ, АвтоВАЗ, УАЗ (входит в «Соллерс»).

Ужесточение конкуренции между автопроизводителями требует сокращения времени вывода на рынок новых продуктов при одновременном обе-

спечении высокого уровня качества и приемлемости стоимости, а также соответствующей организации процессов в сервисе. При этом практика показывает, что качество и надежность автомобилей отечественного производства еще далеки от соответствующих показателей иностранных конкурентов (рис. 3). При этом, исходя из решаемых в работе научно-технических задач, более подробно следует рассмотреть комплекс электрооборудования. И здесь анализ уровня отказов в эксплуатации современных автомобилей российского производства по основным системам, по данным за 2011–2015 гг., показал, что на систему электроснабжения приходится около 32% от общего числа отказов [1, 2].

При этом, с учетом требований инновационности современного АТС, следует подчеркнуть, что технические объекты электрооборудования и электроники как раз являются основными в вопросах улучшения свойств автомобилей. Но с учетом недостаточной надежно-

сти отечественной компонентной базы электрооборудования и электроники встает вопрос, связанный с обеспечением приемлемого уровня работоспособности, в том числе за счет разработки и реализации соответствующих систем диагностики.

Все вышеизложенное свидетельствует о необходимости проведения работ, направленных на научно-техническую разработку и создание перспективных систем мониторинга работоспособности электротехнического комплекса АТС.

Развитие ЭМБ и АКЭУ связано с решением задач повышения надежности и качества функционирования соответствующих объектов в эксплуатации. В традиционных АТС исторически решена часть выделенных задач посредством внедрения системы диагностики ДВС, антиблокировочной системы тормозов (ABS), антипробуксовочной системы (ASR), системы курсовой устойчивости (ESP/ESC/DSC), системы распределения тормозных усилий (EBD/EBV) и многих других. Своевременно проведенная диагностика АТС позволяет устранить причины возможных отказов. Именно от качества и надежности диагностического оборудования зависит безопасность эксплуатации АТС. Современное диагностическое оборудование условно разделяют по проверяемым системам: трансмиссия, тормозная система, силовой агрегат, подвески и колеса, система электропитания и многое другое. Одной из наиболее значимых систем диагностики, на наш взгляд, в любом транспортном средстве является система электрооборудования и электроники.

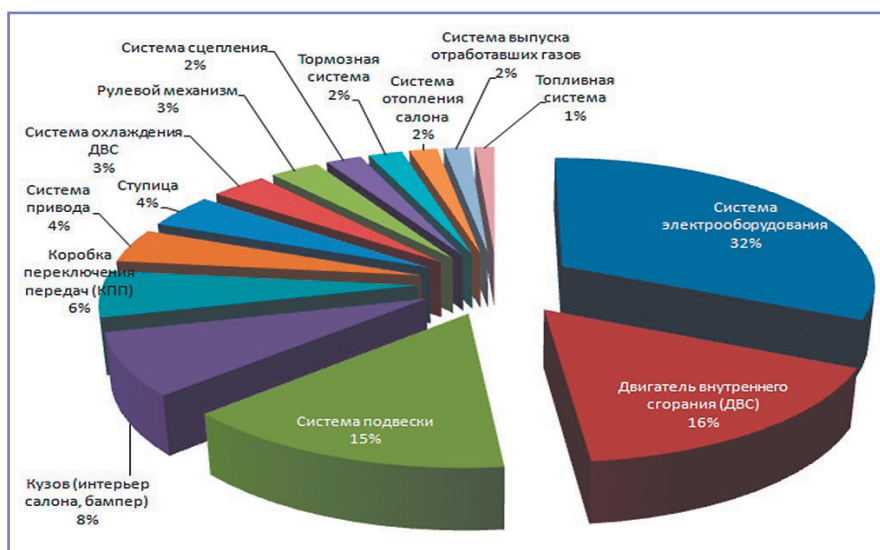


Рис. 3. Анализ уровня отказов в эксплуатации современных автомобилей российского производства по основным системам, по данным за 2011–2015 гг.

Однако первичный анализ научно-технической информации показывает, что выявленная тенденция роста доли электрооборудования при постоянном увеличении потребляемой мощности и все более ужесточающихся требованиях к системам электропитания как на традиционных АТС, так и на перспективных системах ЭМБ, АКЭУ не подкрепляется адекватным системным решением комплексных задач по диагностике систем электрооборудования и электроники в общем и ЭКЭП в частности.

Одним из вопросов, требующих комплексного подхода при эксплуатации и проектировании ЭКЭП, является вопрос мониторинга работоспособности АТО по критерию сопротивления изоляции шин питания относительно корпуса в процессе электрических испытаний [3, 4].

На сегодняшний день при разработке и проектировании электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой в связи со сложностью компонентных элементов в системе электропитания для надежности и безопасности функционирования автотранспортных необходимо соблюдать существующие нормативы [5]:

- измерительные кабели от литий-ионных аккумуляторов в тяговой аккумуляторной батарее (ТАБ) к блоку контроля и выравнивания напряжения (БКВН) должны иметь сечение провода не менее 0,35 мм²;
- кабели должны иметь изоляцию, рассчитанную на напряжение не менее 500 В;
- силовые кабели должны иметь сечение не менее 50 мм²;
- напряжение пробоя изоляции – не ниже 3 кВ;
- силовые провода должны соединять аккумуляторные ящики, ящики с инвертором, инвертор с электродвигателем, преобразователь и зарядное устройство;
- измерительные провода должны соединять аккумуляторные ячейки, входящие в батарею, с аккумуляторной батареей;
- при использовании в целях измерения напряжения при постоянном токе, значение которого равно номинальному напряжению тяговой батареи, сопротивление изоляции между любой незащищенной токопроводящей частью и каждым полюсом батареи составляет 500 Ом/В номинального напряжения;

• сопротивление при выравнивании потенциалов между любыми двумя незащищенными токопроводящими частями составляет не менее 0,1 Ом. Это испытание проводится при силе тока не менее 0,2 А.

При этом обозначенные выше требования не в полной мере способны решить проблему безотказности новых типов автотранспортных средств [6]. Появляется проблема организации комплекса диагностики работоспособности основных систем ЭМБ и АКЭУ. Перспективная система диагностики должна решать комплекс задач по оценке работоспособности АТС и, естественно, должна создаваться на основе электротехнических и электронных компонентов [4].

Рассмотрение существующих областей мониторинга работоспособности АТС показывает, что при высокой значимости обеспечения работоспособности шин питания [5, 6] соответствующие элементы бортового электрооборудования АТС системой диагностики не охвачены. С учетом высокого уровня проблемы обеспечения исправной работы изоляции в условиях глобального развития технологий ЭМБ и АКЭУ, непрерывного расширения спектра электрооборудования в соответствующих комплексах АТС становится актуальной важная научно-техническая проблема создания электротехнической и электронной диагностической системы мониторинга работоспособности с целью обеспечения высоких показателей надежности современных АТС.

Литература

1. Козловский В.Н. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, Д.И. Панюков. – М.: Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH & Co., Deutschland, 2014. – 361 с.
2. Козловский В.Н. Обеспечение качества электромобилей и гибридов в эксплуатации / В.Н. Козловский, В.И. Строганов. – М.: Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH & Co., Deutschland, 2015. – 405 с.
3. Козловский В.Н. Моделирование электрооборудования автомобилей в процессах проектирования и производства: монография / В.Н. Козловский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 227 с.
4. Строганов В.И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства / В.И. Строганов, В.Н. Козловский. – М.: ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 2014. – 264 с.

5. Коломийцев Ю.Н., Новикова А.П. Мониторинг сопротивления изоляции в двухпроводных системах автономного электроснабжения // Вести в электроэнергетику. 2015. № 4. – С. 17–25.

6. Нгуен Куок Уи. Быстродействующие устройства контроля сопротивления изоляции для систем управления энергетическими объектами. Дисс. канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2015.

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).

Новикова Анна Петровна

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила СамГТУ по специальности «Инженер-электрик». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает ассистентом кафедры «ТОЭ» и учится в аспирантуре СамГТУ. Имеет 6 научных работ.

Блинов Николай Игоревич

Родился в 1993 году. В 2016 году окончил СамГТУ по специальности «Автомобильное хозяйство». В настоящее время является магистрантом СамГТУ.

Kozlovskiy Vladimir

Is an engineer, specialization is «Car and tractor electric equipment», in 1999 he graduated from Tolyatti 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).

Novikova Anna

She was born in 1983. In 2005 she graduated from Samara Technical University majoring in «Electrical engineer». She has 11 years of work experience. At present, she works as an assistant of the «Theoretical and General Electrical Engineering» department and studies in graduate school. She has 6 scientific papers.

Blinov Nikolai

Was born in 1993. In 2016 graduated from Samara State Technical University with specialization in «Vehicle fleet». At present, he is in master's degree student at Samara State Technical University.

Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока

// Estimation of an error of calculation of short-circuit currents in ac tractive circuit //

Герман Л.А., д.т.н., профессор,
Нижегородский филиал МГУПС (МИИТ),
г. Нижний Новгород

Кишкурно К.В.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

Субханвердиев К.С.,
«Трансэлектропроект» – филиал ОАО «Росжелдорпроект», г. Москва

Показана причина появления методической погрешности расчета токов короткого замыкания в межподстанционной зоне тяговой сети при эквивалентировании системы внешнего электроснабжения входными сопротивлениями на вводах 110 (220) кВ тяговых подстанций. Проведена оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в различных схемах тяговой сети. Установлено, что при увеличении мощности короткого замыкания на вводах 110 (220) кВ тяговых подстанций указанная погрешность снижается. Показаны возможные пути снижения методической погрешности.

Ключевые слова: система внешнего электроснабжения, система тягового электроснабжения, погрешность расчета, токи короткого замыкания, собственные и взаимные сопротивления, тяговая подстанция.

Постановка задачи

Расчеты токов короткого замыкания при проектировании тяговых подстанций, как правило, выполняют по данным мощности короткого замыкания (КЗ) на шинах 110 (220) кВ, полученных от энергосистемы, так как к моменту расчетов отсутствует прилегающая схема внешнего электроснабжения. При этом игнорируется электрическая связь между подстанциями (взаимное сопротивление) по линиям 110 (220) кВ между двумя смежными подстанциями, к которым подключена тяговая сеть. Тем самым допускается методическая погрешность в расчетах токов короткого замыкания (КЗ) питающих линий контактной сети.

The reason of appearance of a methodical error of calculation of short-circuit currents in zone between substations in AC tractive circuit in a case of equivalenting of an external electric systems with the help of input resistance at tractive substation input 110 (220) kV is shown. Estimation of an error of calculation of short-circuit currents in AC tractive circuit in various circuits of tractive networks is carried out. It is determined that with increasing capacity of a short circuit at tractive substation input 110 (220) kV a stated error is reduced. Possible ways of lowering of a stated methodical error are shown.

Keywords: external electric systems, traction power system, calculation error, short-circuit currents, own and mutual resistances, traction substation.

В частности, в [1, 2] параметры системы внешнего электроснабжения (СВЭ) в схеме замещения для расчета токов КЗ межподстанционной зоны определяют по мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ двух смежных тяго-

вых подстанций, которую предлагается принимать от 400 до 2000 МВА, если отсутствуют более точные сведения. При этом связь в [1, 2] между двумя подстанциями по линиям 110 (220) кВ в виде сопротивления отсутствует, что изменяет реальное токораспределение в тяговой сети при КЗ и определяет методическую погрешность в расчетах. На погрешности расчетов токов КЗ в системе тягового электроснабжения (СТЭ) по причине упрощенного представления СВЭ было указано раньше рядом авторов [3]. Конечно, здесь речь идет о двухсторонней схеме питания контактной сети.

На примере реальной схемы СВЭ оценим методическую погрешность в расчетах токов короткого замыкания в тяговой сети. Будем рассматривать двухцепную линию ВЛ-110 кВ, питающую двухпутный участок, электрифицированный на переменном токе напряжением 27,5 кВ (рис. 1). Кроме того, межподстанционная зона выбрана с малыми значениями мощности КЗ на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций (около 500 МВА), так как погрешность возрастает при снижении мощности КЗ, как это будет показано далее.

Как правило, для расчета токов КЗ на тяговых подстанциях сети СВЭ эквивалентируют с представлением схемы замещения, показанной на рис. 2а. Для подстанций 2 и 3 (рис. 1) сопротивления ветвей схемы, приведенные к напряжению 27,5 кВ, следующие:

$$Z_1 = (0,7 + j1,78)/2, Z_2 = 0,6 + j1,1,$$

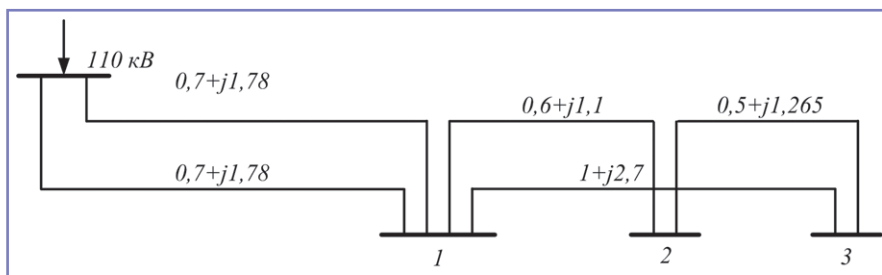


Рис. 1. Схема внешнего электроснабжения тяговых подстанций

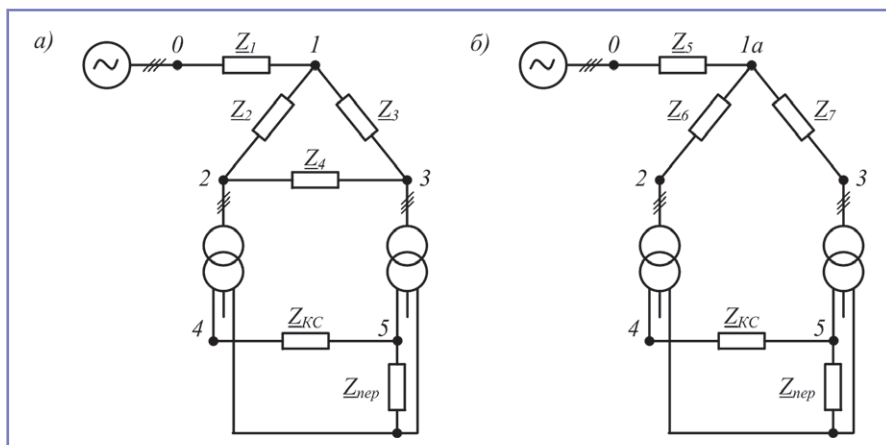


Рис. 2. Схемы замещения при совместном расчете системы внешнего электроснабжения и системы тягового электроснабжения

$$Z_3 = 1 + j2,7 \text{ и } Z_4 = 0,5 + j1,265.$$

Данная схема преобразуется в схему замещения, представленную на рис. 2б, с сопротивлениями $Z_5 = 0,643 + j1,479$, $Z_6 = 0,144 + j0,276$ и $Z_7 = 0,237 + j0,674$. Таким образом, в схеме замещения на рис. 2б собственными сопротивлениями узлов 2 и 3 (без учета тяговой сети) будут сопротивления $Z_{22} = Z_5 + Z_6$ и $Z_{33} = Z_5 + Z_7$, а взаимное сопротивление $Z_{23}(Z_{32}) = Z_5$. Укажем, что взаимное сопротивление $Z_{23}(Z_{32})$ отражает электрическую связь по линиям 110 (220) кВ между тяговыми подстанциями.

Матрица узловых сопротивлений в итоге принимает следующий вид:

$$Z_{2-3} = \begin{bmatrix} 0,787 + j1,755 & 0,643 + j1,479 \\ 0,643 + j1,479 & 0,880 + j2,153 \end{bmatrix}.$$

Теперь разберем схему замещения в проектных расчетах, когда СВЭ представлена только собственными сопротивлениями Z'_{22} и Z'_{33} (рис. 3), а связь по линиям 110 (220) кВ между подстанциями

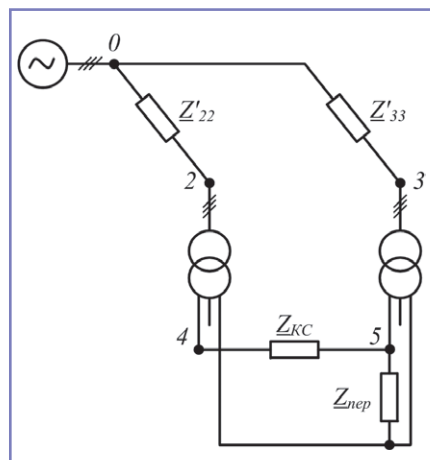


Рис. 3. Схема замещения с системой внешнего электроснабжения, представленной только собственными сопротивлениями

ми (взаимное сопротивление) отсутствует. Логично в этом случае для той же схемы СВЭ (рис. 1) принять входные сопротивления подстанций по данным матрицы Z_{2-3} , то есть матрица сопротивлений узлов 2 и 3 подстанций, представленная в виде диагональной, запишется как

$$Z'_{2-3} = \begin{bmatrix} 0,787 + j1,755 & 0 \\ 0 & 0,880 + j2,153 \end{bmatrix}.$$

Такая запись упрощает расчет, но вносит дополнительную погрешность.

Таким образом, для оценки погрешности расчета токов КЗ в СТЭ следует

сравнить результаты этого расчета, полученные при различных схемах замещения СВЭ, показанных на рис. 2б и 3. При этом важно отметить, что для оценки наибольшей погрешности следует рассчитывать не суммарные токи КЗ в тяговой сети, а значения токов КЗ, протекающих по питающим линиям контактной сети.

Расчет токов КЗ в различных схемах тяговой сети и оценка полученных результатов

Для решения задачи рассмотрен двухпутный участок (рис. 4) с подстанциями, расстояние между которыми составляет 48,2 км. Контактная подвеска, выполненная проводами типа ПБСМ-95 + МФ-100, получает питание через понижающие трансформаторы типа ТДТНЭ-40000/110.

Следует указать, что расчет токов КЗ в СТЭ с учетом реальной схемы СВЭ рассмотрен, к примеру, в [5] и [6], где в расчетах введены продольная и поперечная несимметрии тяговой сети. Тем не менее считаем целесообразным проведение расчета токов КЗ в тяговой сети с учетом СВЭ по программе РАСТ-05К [3], использующейся много десятков лет при совместных расчетах СВЭ и СТЭ.

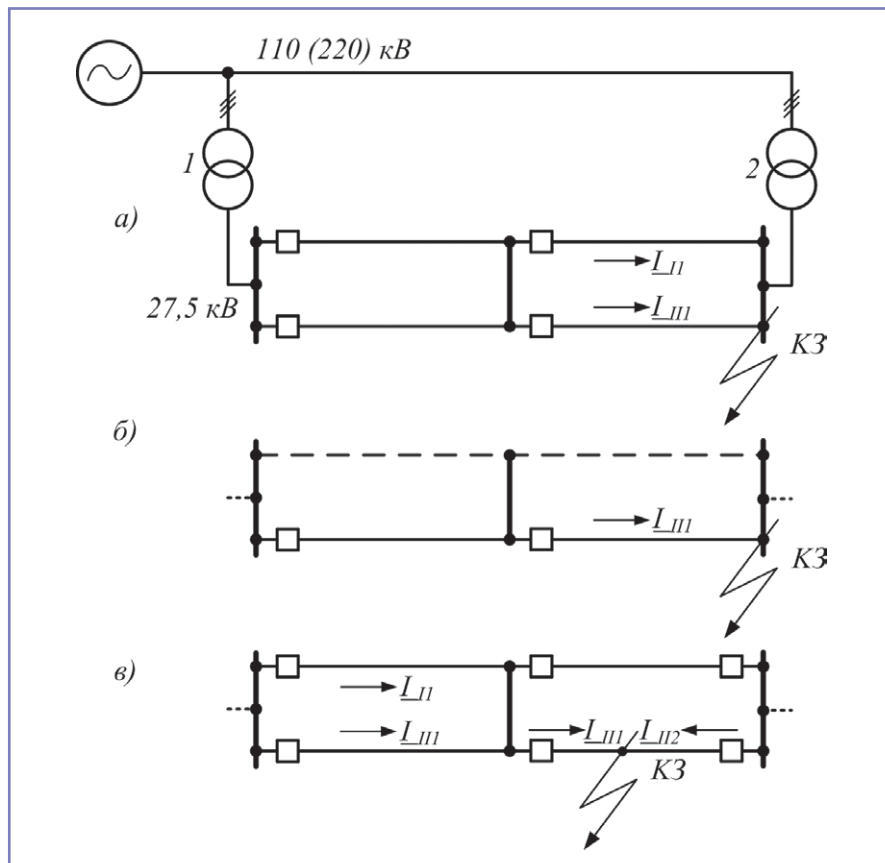


Рис. 4. Расчетные схемы тяговой сети

Таблица 1

	Токи КЗ в расчетных схемах тяговой сети, кА			
	I_{II} и I_{III} на рис. 4а			I_{III} на рис. 4б
	ТП	ТПУ	ЭУП	ТП (однопутный участок)
Z_{2-3}	$0,651e^{-j63,088^\circ}$	$0,738e^{-j66,091^\circ}$	$0,858e^{-j64,364^\circ}$	$0,614e^{-j57,969^\circ}$
Z'_{2-3}	$0,958e^{-j66,752^\circ}$	$1,075e^{-j69,166^\circ}$	$1,229e^{-j67,187^\circ}$	$0,944e^{-j63,107^\circ}$
Погрешность, %	47	46	43	54

Таблица 2

	Токи КЗ в расчетных схемах тяговой сети, кА		
	$I_{I,1}$ и $I_{II,1}$ на рис. 4в	$I_{II,1}$ (участок ПС – ТП2) на рис. 4в	$I_{II,2}$ на рис. 4в
	ТП	ТП	ТП
Z_{2-3}	$0,757e^{-j66,441^\circ}$	$1,774e^{-j67,534^\circ}$	$1,704e^{-j69,191^\circ}$
Z'_{2-3}	$0,937e^{-j67,669^\circ}$	$2,231e^{-j68,256^\circ}$	$2,069e^{-j69,198^\circ}$
Погрешность, %	24	26	21

Расчет токов КЗ выполнен при следующих расчетных условиях с учетом вариантов расположения проводов тяговой сети [1, 2] – ТП, ТПУ и ЭУП:

КЗ на шинах 27,5 кВ (расположение проводов тяговой сети – контактная сеть содержит несущий трос и контактный провод (ТП)) (рис. 4а);

- КЗ на шинах 27,5 кВ в системе с усиливающим проводом (ТПУ) (рис. 4а);

- КЗ на шинах 27,5 кВ в системе с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП) (рис. 4а);

- КЗ на шинах 27,5 кВ, если один из путей отключен (однопутный участок) (рис. 4б);

- КЗ на участке между подстанцией и постом секционирования (рис. 4в).

Результаты проведенных расчетов и их сопоставление представлены в таблицах 1 и 2.

Для полноты анализа произведем расчет токов КЗ в контактной сети двухпутного участка, питаемого от подстанций, расположенных несколько ближе к источнику питания, исключив тем самым из схемы на рис. 2а ветвь 0–1. Элементы матрицы сопротивлений узлов подстанций примут следующие значения:

- при учете собственных и взаимных сопротивлений СВЭ

$$Z''_{2-3} = \begin{bmatrix} 0,944 + j2,106 & 0,772 + j1,775 \\ 0,772 + j1,775 & 1,056 + j2,584 \end{bmatrix};$$

- при учете только собственных сопротивлений СВЭ

$$Z'_{2-3} = \begin{bmatrix} 0,437 + j0,865 & 0 \\ 0 & 0,530 + j1,263 \end{bmatrix};$$

Результаты расчета, полученные при тех же расчетных условиях, и их сопоставление показаны в таблицах 3 и 4.

Из таблиц 1–4 видно, что в зависимости от способа задания матрицы сопротивлений СВЭ результаты расчета токов КЗ значительно отличаются, и учет только собственных сопротивлений без взаимных приводит к некоторому увеличению расчетных токов и получению чрезмерно большой погрешности. Более того, эта погрешность увеличивается при переходе на однопутный участок (см. таблицы 1 и 3). Применение усиливающего провода (ТПУ) или экранирующего и усиливающего проводов (ЭУП) в СТЭ на величину погрешности практически не влияет (таблицы 1 и 3).

Из сопоставления таблиц 1, 2 и 3, 4 следует, что погрешность снижается по

мере приближения подстанций к источнику питания, то есть с уменьшением сопротивления СВЭ. В частности, значительное уменьшение величины взаимного сопротивления в сопротивлении СВЭ при приближении к источнику определяет снижение погрешности, обусловленной, как известно, игнорированием в расчете этого взаимного сопротивления.

С уменьшением сопротивления СВЭ со значением мощности КЗ на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций $S_{K3} = 450$ МВА до сопротивления с $S_{K3} = 850$ МВА погрешность результатов расчета (см. таблицы 1–4) уменьшилась примерно в два раза и составила не более 23%. Равным образом со значением мощности КЗ $S_{K3} \geq 1500$ МВА погрешность уже будет составлять менее 20%. Таким образом, при расчете токов КЗ в СТЭ необходимо обращать особое внимание на величину мощности КЗ, по которой, как показал анализ, можно судить о точности результатов расчета.

Пути снижения методической погрешности расчета токов КЗ

Для снижения погрешности расчета токов КЗ следует ориентироваться на следующие мероприятия.

1. Необходимо запросить реальную схему сети СВЭ в районе подключения тяговых подстанций и пересчитать токи КЗ в СТЭ, добавив в расчет сопротивление электрической связи подстанций по линиям 110 (220) кВ, как это было показано выше. По полученным данным необходимо откорректировать расчет релейной защиты. Следует отметить, что знание параметров

Таблица 3

	Токи КЗ в расчетных схемах тяговой сети, кА			
	I_{II} и I_{III} на рис. 4а			I_{III} на рис. 4б
	ТП	ТПУ	ЭУП	ТП (однопутный участок)
Z'_{1-2}	$0,900e^{-j63,439^\circ}$	$1,031e^{-j66,544^\circ}$	$1,214e^{-j64,496^\circ}$	$0,817e^{-j58,690^\circ}$
Z''_{1-2}	$1,095e^{-j65,994^\circ}$	$1,252e^{-j68,846^\circ}$	$1,466e^{-j66,597^\circ}$	$1,006e^{-j61,972^\circ}$
Погрешность, %	22	21	21	23

Таблица 4

	Токи КЗ в расчетных схемах тяговой сети, кА		
	$I_{I,1}$ и $I_{II,1}$ на рис. 4в	$I_{II,1}$ (участок ПС – ТП2) на рис. 4в	$I_{II,2}$ на рис. 4в
	ТП	ТП	ТП
Z'_{1-2}	$0,982e^{-j66,385^\circ}$	$2,302e^{-j67,478^\circ}$	$2,211e^{-j69,136^\circ}$
Z''_{1-2}	$1,113e^{-j67,379^\circ}$	$2,580e^{-j68,174^\circ}$	$2,438e^{-j69,414^\circ}$
Погрешность, %	13	12	10

схемы сети СВЭ необходимо для получения всех элементов матрицы сопротивлений узлов рассматриваемых подстанций.

2. В случае, когда получение схемы сети СВЭ не представляется возможным, предлагается следующий расчетный способ определения матрицы узловых сопротивлений СВЭ для снижения методической погрешности. Нужно определить параметры сети СВЭ, в частности, собственные и взаимные сопротивления узлов 110 кВ тяговых подстанций, используя предложение [8]. Для оценки эффективности предложенного способа найдем токи КЗ в контактной сети двухпутного участка, питаемого от подстанций 2 и 3, и сопоставим их с ранее полученными значениями.

На рассматриваемом двухпутном участке контактной сети были экспериментально определены собственные и взаимные сопротивления между подстанциями, которые составили $\underline{Z}_{22}'' = 0,944 + j2,106$, $\underline{Z}_{33}'' = 1,056 + j2,584$ и $\underline{Z}_{23}'' (\underline{Z}_{32}'') = 0,772 + j1,775$. Элементы матрицы сопротивлений получили следующие значения:

$$\underline{Z}_{2-3}'' = \begin{vmatrix} 0,944 + j2,106 & 0,772 + j1,775 \\ 0,772 + j1,775 & 1,056 + j2,584 \end{vmatrix}.$$

В результате были определены токи КЗ в рассматриваемых расчетных условиях, значения которых и их сопоставление с ранее рассчитанными токами показаны в таблицах 5 и 6.

Анализ данных таблиц показывает, что применение указанного способа приводит к уменьшению погрешности расчета. Это объясняется тем, что полученные при

этом способе значения элементов матрицы сопротивлений узлов рассматриваемых подстанций приближаются к значениям, найденным по реальной схеме СВЭ.

Таким образом, погрешность составила не более 9%, что указывает на целесообразность применения предложения [8] в расчетах при отсутствии схемы подключения подстанций к СВЭ и ее параметров.

Оценка погрешности методом упрощенного расчета токов короткого замыкания

Для подтверждения существующей погрешности расчетов токов КЗ в тяговой сети с двухсторонним питанием в случае представления СВЭ сопротивлениями, рассчитанными по мощности КЗ, выполним упрощенный расчет при различных схемах замещения, показанных на рис. 2б и 3. Представленный сравнительный расчет отличается наглядностью изложения, для этого ограничились в схеме только индуктивными сопротивлениями, показанными на рис. 5 (значения сопротивлений указаны в знаменателе). Все сопротивления приведены к напряжению тяговой сети, а схема замещения трансформатора – «Звезда – звезда».

При варианте, когда входное сопротивление на шинах 110 (220) кВ определяется по известным данным параметров схемы энергосистемы (рис. 5), ток короткого замыкания при повреждении в точке К

$$I_K = \frac{U}{X_1} = \frac{U}{\left[2X_{BX} + \frac{2(X_L + X_{T2}) \times (2X_{T1} + X_{KC})}{2(X_L + X_{T2}) + (2X_{T1} + X_{KC})} \right] \times \left[\frac{2(X_L + X_{T2}) + (2X_{T1} + X_{KC})}{2(X_L + X_{T2})} \right]},$$

где U – напряжение тяговой сети, кВ; X_1 – сопротивление цепи короткого замыкания.

Множитель 2 учитывает, что сопротивления определяют при двухфазном коротком замыкании в трехфазных элементах

$$I_K = \frac{U}{X_1} = \frac{27,5}{\left[2 \times 2 + \frac{2(1+1) \times (2 \times 1 + 10)}{2(1+1) + (2 \times 1 + 10)} \right] \times \left[\frac{2(1+1) + (2 \times 1 + 10)}{2(1+1)} \right]} = 0,982 \text{ кА}.$$

В случае, когда энергосистема представлена сопротивлениями у тяговых подстанций, определяемыми по мощности КЗ, заданной энергосистемой (рис. 6), ток короткого замыкания в тяговой сети при повреждении в точке К

$$I'_K = \frac{U}{2(X_{C1} + X_{T1}) + X_{KC}} = \frac{27,5}{2(2 + 1) + 10} = 1,719 \text{ кА}.$$

Значения сопротивлений 2 и 3 Ом определены из предыдущей схемы (рис. 5) как собственные сопротивления узлов – шин 110 кВ тяговых подстанций. Считаем, что эти сопротивления будут определять мощности КЗ на шинах 110 кВ, которые и будут переданы энергосистемой.

Таблица 5

	Токи КЗ в расчетных схемах тяговой сети, кА			
	I_{II} и I_{III} на рис. 4а			I_{III} на рис. 4б
	ТП	ТПУ	ЭУП	ТП (однопутный участок)
$\underline{Z}_{2,3}''$	$0,601e^{-j63,197^\circ}$	$0,679e^{-j66,108^\circ}$	$0,785e^{-j64,434^\circ}$	$0,581e^{-j58,892^\circ}$
$\underline{Z}_{2-3}$	$0,651e^{-j63,088^\circ}$	$0,738e^{-j66,091^\circ}$	$0,858e^{-j64,364^\circ}$	$0,614e^{-j57,969^\circ}$
Погрешность, %	8	8	9	5

Таблица 6

	Токи КЗ в расчетных схемах тяговой сети, кА		
	I_{L1} и I_{L2} на рис. 4в	I_{L1} (участок ПС – ТП2) на рис. 4в	I_{L2} на рис. 4в
	ТП	ТП	ТП
$\underline{Z}_{2,3}''$	$0,704e^{-j66,389^\circ}$	$1,636e^{-j67,421^\circ}$	$1,552e^{-j69,020^\circ}$
$\underline{Z}_{2-3}$	$0,757e^{-j66,441^\circ}$	$1,774e^{-j67,534^\circ}$	$1,704e^{-j69,191^\circ}$
Погрешность, %	7	8	9

Сравнение результатов расчетов указывает на значительную погрешность, возникающую при представлении СВЭ входными сопротивлениями, определяемыми по мощности КЗ:

$$\delta = \frac{|0,982 - 1,719|}{0,982} 100\% = 75\%.$$

Конечно, принятое в схеме по рис. 5 значение $X_{BX} = 2$ Ом редко бывает в условиях эксплуатации, но при уменьшении входного сопротивления в два раза погрешность уменьшается до 45%, а в случае уменьшения в четыре раза погрешность составляет 21%, то есть остается существенной.

Таким образом, расчет тока КЗ в тяговой сети по схеме замещения в нормативных документах ОАО «РЖД» дает методическую ошибку.

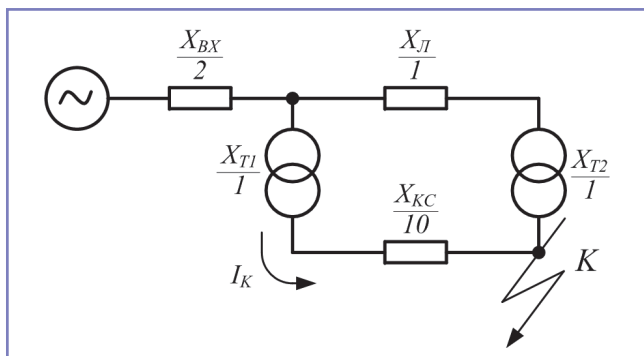


Рис. 5. Схема замещения с сопротивлениями СВЭ, полученными путем эквивалентирования:

X_{BX} – входное сопротивление энергосистемы, Ом;

$X_{Л}$ – сопротивление фазы линии электропередачи между подстанциями, Ом;

$X_{Т1}$, $X_{Т2}$ – сопротивления трансформаторов на фазу, Ом;

$X_{КС}$ – сопротивление тяговой сети, Ом

Выводы

Предлагаемая схема замещения в нормативных документах [1, 2] дает погрешность результатов расчета токов КЗ в межподстанционной зоне тяговой сети при ее двухстороннем питании.

Определение входного сопротивления на шинах 110 (220) кВ по мощности короткого замыкания, заданного энергосистемой, и игнорирование электрической связи по линиям 110 (220) кВ (то есть взаимным сопротивлением) между двумя смежными подстанциями, к которым подключена тяговая сеть, приводит к методической погрешности в расчете токов КЗ питающих линии контактной сети, достигающей 50% и более при любой схеме тяговой сети.

В нормативных документах [1, 2] при определении токов КЗ в тяговой сети в расчетной схеме отсутствует электрическая связь тяговых подстанций по линии 110 (220) кВ, что приводит к методической погрешности.

Указанная погрешность снижается с увеличением мощности $S_{КЗ}$ на шинах смежных тяговых подстанций, когда взаимное сопротивление в общем сопротивлении СВЭ значительно уменьшается. Уже при мощности $S_{КЗ} \geq 1500$ МВА погрешность составляет менее 20%.

Для снижения погрешности расчета токов КЗ в тяговой сети следует выполнить расчет с использованием программы РАСТ-05К совместного расчета систем СВЭ и СТЭ по реальной схеме подключения тяговых подстанций к энергосистеме с указанием ближайших линий 110 (220) кВ или по данным входного собственного сопротивления СВЭ с уче-

том сопротивления связи по линиям 110 (220) кВ между подстанциями.

В случае малой мощности КЗ энергосистемы (до 1000 МВА) и при отсутствии схемы СВЭ показана целесообразность руководствоваться предложением [8] при определении значений элементов матрицы узловых сопротивлений СВЭ с целью снижения погрешности расчетов токов КЗ в тяговой сети.

Анализ полученных результатов указывает на необходимость расчета токов КЗ в тяговой сети с учетом сопротивления связи тяговых подстанций по линиям 110 (220) кВ (с учетом взаимных сопротивлений), без чего невозможно получить достаточно точные значения токов КЗ, необходимые для качественной настройки и всестороннего анализа поведения релейной защиты.

Литература

1. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. – М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005. – 216 с.
2. СТО РЖД 07.021.4–2015 «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока».
3. Герман Л.А., Кишкурно К.В. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / Вестник ВНИИЖТ, 2013. № 1. С. 16–21.
4. Герман Л.А., Морозов Д.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ: учеб. пос. – М.: МИИТ, 2010. – 59 с.
5. Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок / И.П. Крючков,

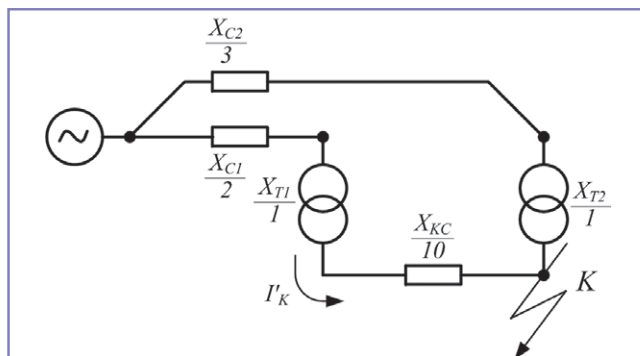


Рис. 6. Схема замещения с сопротивлениями СВЭ, полученными по мощности короткого замыкания:

X_{C1} , X_{C2} – собственные сопротивления вводов 110 кВ первой и второй подстанций, Ом

В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. – Издательский дом МЭИ, 2008. – 472 с.

6. Лосев С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.

7. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей / Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 232 с.

8. Патент № 23967077. Способ определения узлового взаимного сопротивления в тяговой сети железных дорог. Герман Л.А. Оpubл. 20.08.2001.

Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. Окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик» (1959 год). Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрификация и электроснабжение» Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения, член-корреспондент Российской Академии транспорта. Автор более 350 научных трудов, 70 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

Кишкурно Константин Вячеславович

Родился в 1991 году. В 2012 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Кандидат технических наук. В 2016 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование системы тягового электроснабжения с применением регулирующих устройств и компенсирующих

установок реактивной мощности». Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает инженером 2 категории АО «Метрогипротранс». Имеет 16 статей, 4 полезные модели, 3 изобретения и 2 свидетельства регистрации программы для ЭВМ.

Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает инженером I категории в Проектно-изыскательном институте электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект» – филиале ОАО «Росжелдорпроект». Имеет 2 научные статьи.

German Leonid

Was born in 1937. He has graduated Moscow

Institute of Transport Engineers by specialty «Engineer routes – electrician» (1959). He has defended the dissertation by the theme «Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation». He is a Doctor of Technical Sciences, Professor of dept. «Electrification and Utilities» at The Nizhny Novgorod branch of the Russian State University of Transport Communications. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 350 scientific works, 70 inventions and patents. Has 2 government awards.

Kishkurno Konstantin

Was born in 1991. In 2012 he graduated from Moscow Institute of Transport Engineers (MIIT), speciality is «Railway roads power supply». He is candidate of Technical sciences. In

2016 he defended thesis, subject of dissertation is «Update of the traction power supply system with the use of control devices and compensating reactive power plants». He has 4 years of work experience. At present he works as second category engineer of «Metrogiptrans» Co Ltd. He has 16 articles, 4 utility models, 3 inventions and 2 software registration certificates for ECM.

Subhanverdiev Kamil'

Was born in 1989. In 2012 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering with specialization «Railways electric power supply». He has 4 years of work experience. At present, he works as a first class engineer at Design and survey institute of railways electrification and electric power plants «Transelectroproject» – branch of «Roszheldorproject». He has two scientific works.

Редакционный совет журнала поздравляет доктора технических наук, профессора Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения Леонида Абрамовича Германа с 80-летием и желает ему творческих успехов, счастья, здоровья и долголетия!



Герман Леонид Абрамович – член двух диссертационных советов по присуждению ученых степеней доктора технических наук при МИИТ (Москва) и НГТУ (Нижегородский государственный технический университет), член-корреспондент Академии транспорта России, член редколлегии журнала «Электроника и электрооборудование транспорта». Удостоен знаков «Лучший изобретатель железнодорожного транспорта», «Почетному железнодорожнику», «200 лет транспортному образованию России». Награжден медалью «За трудовую доблесть» за электрификацию магистрали Москва – Байкал и восемью медалями ВДНХ. За значительные успехи в деле подготовки высококвалифицированных специалистов и большой вклад в развитие научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте награжден почетными грамотами Министерства образования и науки Российской Федерации, Министерства путей сообщения и президента ОАО «РЖД». Почетный работник Горьковской железной дороги.

Мы благодарны Леониду Абрамовичу за участие в редакционном совете нашего журнала и за поддержку, которую он оказывает нам в работе.

**Редакционный совет журнала
«Электроника и электрооборудование транспорта»**

Стабильность выходного напряжения преобразователя частоты системы централизованного электроснабжения поездов

// Stability of the frequency converter output voltage for the system of train centralized power supply //

Иньков Ю.М., д.т.н., профессор,
Сачкова Е.В., к.ф.н.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

В статье проанализирована стабильность параметров выходного напряжения тиристорного непосредственного преобразователя частоты для системы централизованного электроснабжения пассажирских поездов от автономных локомотивов. Поскольку уровень и частота напряжения синхронного генератора автономного локомотива и фазовый угол нагрузки вагонных потребителей электроэнергии представляют собой случайные величины, анализ стабильности выходного напряжения преобразователя выполнен с применением теоретико-вероятностных методов.

Ключевые слова: электроснабжение поезда, непосредственный преобразователь частоты, частота напряжения, величина напряжения, теория вероятностей, дисперсия, генератор, вагонные потребители электроэнергии, полупроводниковый вентиль, тепловоз.

The article analyzes the stability of the parameters of the output voltage of the thyristor direct frequency converter for the systems of centralized power supply for passenger trains from the autonomous locomotives. Due to the fact that the level and frequency of voltage of the synchronous generator in the autonomous locomotive and the load phase of the electricity carriage consumers are random variables the analysis of the stability of the output voltage of the converter is performed with the use of theoretical and probabilistic methods.

Keywords: train power supply, direct frequency converter, voltage frequency, voltage value, probability theory, variance, generator, car electricity consumers, a semiconductor valve, locomotive.

На автономных пассажирских локомотивах для электроснабжения вагонных потребителей устанавливаются специальный синхронный генератор и статический преобразователь частоты, в данном случае – непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) [1].

Выходное напряжение такого преобразователя является функцией выходного напряжения синхронного генератора, способа регулирования и точности системы управления преобразователем и фазового угла нагрузки, причем частота и величина выходного напряжения генератора, а также фазовый угол нагрузки являются случайными величинами. Поэтому анализ стабильности выходного напряжения НПЧ более корректно выполнять, основываясь на применении теоретико-вероятностных методов [2].

Проанализируем кривую выходного напряжения многофазно-однофазного НПЧ (рис. 1), допуская, что активное сопротивление и индуктивность генератора равны нулю, ток нагрузки непрерывен, а сопротивление вентилей в проводящем состоянии эквивалентировано соответствующей нагрузкой.

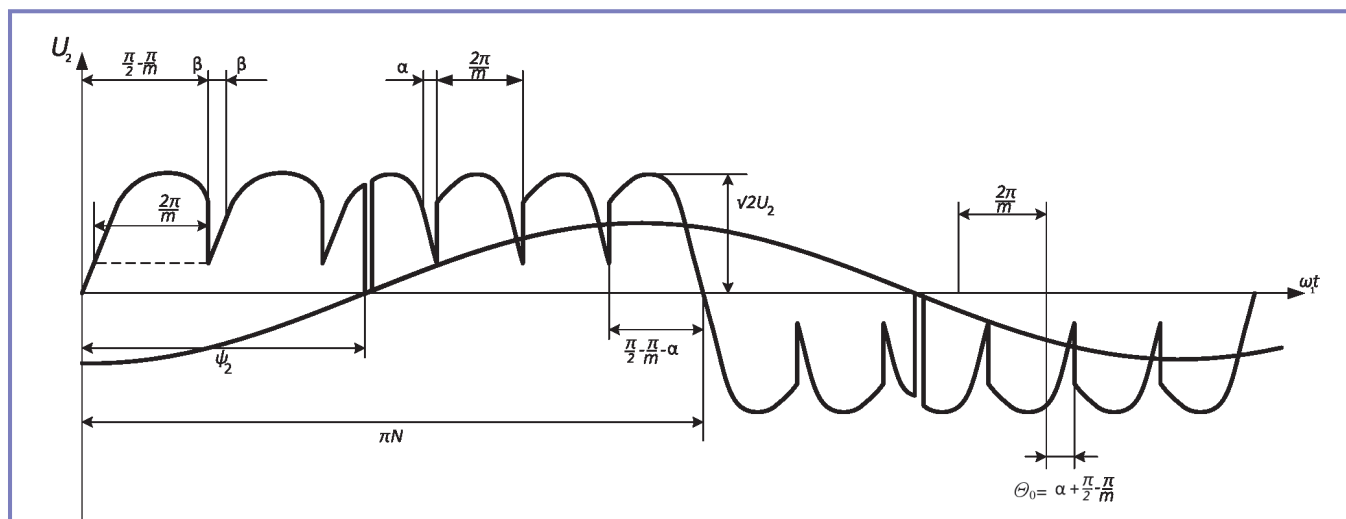


Рис. 1. Кривая выходного напряжения трехфазно-однофазного НПЧ

В этом случае эффективное значение выходного напряжения НПЧ определим по соотношению

$$U_2 = U_{1M} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{x_1} \sin^2 N_x dx + \sum_{l_u=1}^{l_u=K_u} \int_{x_1+(l_u-1)\Delta\Psi}^{x_2+l_u\Delta\Psi} \sin^2 [Nx - (l_u-1)N\Delta\Psi] dx + \sum_{l_u=K_u+1}^{l_u=\mu} \int_{x_2+(l_u-1)\Delta\Psi}^{x_2+l_u\Delta\Psi} \sin^2 [Nx - (K_u-1)N\Delta\Psi] dx + \int_{\pi-x_2}^{\pi} \sin^2 N(x-\mu\Delta\Psi+\Delta\Psi) dx}, \quad (1)$$

где $\sqrt{2}U_1 = U_{1M}$ – амплитудное значение линейного напряжения генератора;

l_u , l_u – номера интервалов включенного состояния вентилей в выпрямительном и инверторном режимах;

$\frac{f_1}{f_2} = N$ – отношение частот входного и выходного напряжений;

μ – число выпрямленных полуволн напряжения генератора на полупериоде выходного напряжения;

K_u – целое число интервалов проводимости вентилей в инверторном режиме. $K_u = \frac{\Psi_2}{\Delta\Psi}$, при дробном K_u его следует округлять до ближайшего большего целого;

Ψ_2 – угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи нагрузки;

$\Delta\Psi$ – угол сдвига фаз между линейными напряжениями генератора;

m – число фаз генератора.

Из информации, представленной на рис. 1, видно, что

$$x_1 = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \beta \right) \frac{1}{N},$$

$$x_2 = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha \right) \frac{1}{N},$$

где α и β – углы регулирования в выпрямительном и инверторном режимах.

Интегрируя выражение (1), получим

$$U_2 = U_{1M} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m(N-1)}{4\pi N} \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\alpha - \frac{(K_u-1) \sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi N} (\cos 2\alpha + \cos 2\beta)}. \quad (2)$$

Характеристика фазорегулирующего устройства, наиболее часто применяемого в системах управления непосредственными преобразователями частоты [3], имеет вид

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{U_y}{U_{on}}, \quad (3)$$

где U_y и U_{on} – амплитудные значения моделирующего (управляющего) и синхронизирующего напряжения системы управления.

Подставляя (3) в (2), получим

$$U_2 = U_{1M} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{U_y}{U_{on}} \left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{\Psi_2}{\pi} \right) - \frac{f_2}{f_1} \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] - \frac{\sin \pi}{\pi} \cos 2\beta \left(\frac{m\Psi_2}{2\pi} - \frac{f_2}{f_1} \right) \right)}. \quad (4)$$

Таким образом, эффективное значение выходного напряжения преобразователя является функцией взаимно независимых случайных величин U_{1M} , U_y , U_{on} , f_1 , f_2 и Ψ_2 , причем влияние каждой из этих величин на эффективное значение выходного напряжения мало. Поэтому в соответствии с центральной предельной теоремой в первом приближении можно считать, что величина U_2 имеет распределение, близкое к нормальному.

Известны четыре возможных способа построения системы управления НПЧ:

- модулирующее U_y и синхронизирующее U_{on} напряжения не стабилизированы и изменяются пропорционально изменению напряжения источника питания, то есть $u_y = a u_p$, $u_{on} = b u_p$, где a и b – коэффициенты пропорциональности;

- модулирующее напряжение стабилизировано, а синхронизирующее – не стабилизировано;

- модулирующее напряжение не стабилизировано, а синхронизирующее – стабилизировано;

- модулирующее и синхронизирующее напряжения стабилизированы.

Ниже представлены общие выражения для дисперсий эффективного значения выходного напряжения преобразователя и частные производные от этого напряжения для первого способа. Аналогично могут быть получены выражения и для других способов.

$$\frac{\partial u_2}{\partial U_{1M}} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{\Psi_2}{\pi} \right) - \frac{f_2}{f_1} \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] - \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\beta \left(\frac{m\Psi_2}{2\pi} - \frac{f_2}{f_1} \right)}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial f_1} = - \frac{U_{1M} \left[\frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left(\frac{m}{2} - 1 \right) f_2 + \frac{f_2 \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\beta}{\pi} \right]}{2 f_1^2 \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{\Psi_2}{\pi} \right) - \frac{f_2}{f_1} \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] - \frac{\sin^2 \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \cos 2\beta \left(\frac{m\Psi_2}{\pi} - \frac{2f_2}{f_1} \right)}}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial f_2} = - \frac{U_{1M} \left[\frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left(\frac{m}{2} - 1 \right) + \frac{\sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\beta}{\pi} \right]}{2 f_1 \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{\Psi_2}{\pi} \right) - \frac{f_2}{f_1} \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] - \frac{\sin^2 \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \cos 2\beta \left(\frac{m\Psi_2}{\pi} - \frac{2f_2}{f_1} \right)}}, \quad (10)$$

Раскладывая выражение (4) в ряд Тейлора и ограничиваясь линейными членами разложения, получим

$$du_2 = \frac{\partial u_2}{\partial U_{1M}} du_{1M} + \frac{\partial u_2}{\partial f_1} df_1 + \frac{\partial u_2}{\partial f_2} df_2 + \frac{\partial u_2}{\partial \Psi_2} d\Psi_2. \quad (5)$$

Дисперсия эффективного значения выходного напряжения в соответствии с общим методом равна

$$\sigma_{U_2}^2 = \left(\frac{\partial u_2}{\partial U_{1M}} \right)^2 \sigma_{U_{1M}}^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial f_1} \right)^2 \sigma_{f_1}^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial f_2} \right)^2 \sigma_{f_2}^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial \Psi_2} \right)^2 \sigma_{\Psi_2}^2. \quad (6)$$

Отклонение величины выходного напряжения преобразователя в соответствии с техническими условиями на преобразователя оговаривается, как правило, для номинального режима работы. Поэтому коэффициенты перед дисперсиями в выражении (6) должны представлять собой значения квадратов частных производных, найденных при математических ожиданиях аргументов, соответствующих номинальному режиму работы, то есть U_{1M} , f_1 , f_2 , Ψ_2 .

Используя относительные средние квадратические отклонения $\sigma_{j0} = \frac{\sigma_j}{m_j}$ и разделив обе части выражения (6) на $\overline{U_2}^2$, запишем

$$\sigma_{U_2,0}^2 = \left(\frac{\partial u_2}{\partial U_{1M}} \right)^2 \frac{\sigma_{U_{1M,0}}^2 \overline{U_{1M}}^2}{\overline{U_2}^2} + \left(\frac{\partial u_2}{\partial f_1} \right)^2 \frac{\sigma_{f_1,0}^2 \overline{f_1}^2}{\overline{U_2}^2} + \left(\frac{\partial u_2}{\partial f_2} \right)^2 \frac{\sigma_{f_2,0}^2 \overline{f_2}^2}{\overline{U_2}^2} + \left(\frac{\partial u_2}{\partial \Psi_2} \right)^2 \frac{\sigma_{\Psi_2,0}^2 \overline{\Psi_2}^2}{\overline{U_2}^2}. \quad (7)$$

В частности, для первого способа построения системы управления, то есть при нестабилизированных напряжениях U_y и U_{on} , частные производные от U_2 будут иметь вид

$$\frac{\partial u_2}{\partial \psi_2} = - \frac{U_{1M} \left[\frac{m \sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) - \frac{m \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\beta}{2\pi^2} \right]}{2 \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{\bar{\psi}_2}{\pi} \right) - \frac{\bar{f}_2}{f_1} \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{\pi} \cos 2\beta \left(\frac{m\bar{\psi}_2}{\pi} - \frac{2\bar{f}_2}{f_1} \right)}} \quad (11)$$

Подставляя найденные значения частных производных в выражение (7), получим

$$\sigma_{U_2}^2 = \sigma_{U_{1M}}^2 + \frac{\left[\frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left(\frac{m}{2} - 1 \right) + \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{\pi} \cos 2\beta \right]^2 \bar{f}_2^2 (\sigma_{f_{j0}}^2 + \sigma_{f_{j0}}^2)}{4 \bar{f}_1^2 \left\{ \frac{1}{2} - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{\bar{\psi}_2}{\pi} \right) - \frac{\bar{f}_2}{f_1} \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] - \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\beta \left(\frac{m\bar{\psi}_2}{2\pi} - \frac{\bar{f}_2}{f_1} \right) \frac{1}{\pi} \right\}} +$$

$$+ \frac{\left[\frac{m \sin \frac{2\pi}{m}}{4\pi^2} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) - \frac{m \sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi^2} \cos 2\beta \right]^2 \bar{\psi}_2^2 \sigma_{\psi_{j0}}^2}{4 \left\{ \frac{1}{2} - \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{2\pi} \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2} \right) \left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{\bar{\psi}_2}{\pi} \right) - \frac{\bar{f}_2}{f_1} \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\beta \left(\frac{m\bar{\psi}_2}{2\pi} - \frac{\bar{f}_2}{f_1} \right) \right\}} \quad (12)$$

Вторым показателем стабильности выходного напряжения вентильного преобразователя является отклонение частоты выходного напряжения от ее номинального значения.

В непосредственных преобразователях частоты стабилизации задающего генератора оказывается недостаточно, поскольку на отклонения величины выходной частоты НПЧ значительное влияние оказывает отклонение входной частоты.

В то же время следует отметить, что наряду с уже упомянутой областью систем централизованного электроснабжения пассажирских поездов НПЧ можно успешно применять в автономных бортовых энергосистемах для связи цепей переменного тока с различной частотой и напряжением. Особенно выигрышно по сравнению с другими типами преобразователей применение НПЧ в бортовых энергосистемах, в которых частота напряжения синхронного генератора изменяется в достаточно широких пределах, а напряжение питания ряда преобразователей (например, гироскопов летательных аппаратов, люминесцентных ламп и т.п.) должно иметь стабильную частоту. Достаточно жесткие требования предъявляют и к преобразователям частоты для централизованного электроснабжения пассажирских поездов, где по условиям ограничения мешающего воздействия преобразователя на рельсовые цепи СЦБ выходная частота НПЧ должна быть

на любой позиции контроллера машиниста стабилизирована с точностью $\pm 5\%$, причем постоянная составляющая в кривой выходного напряжения преобразователя должна быть минимальной.

В НПЧ с естественной коммутацией тока применяют асинхронные и синхронные системы управления. В первом случае кривая выходного напряжения преобразователя не синхронизирована с кривой его входного напряжения, и поэтому вследствие дискретности формирования выходного напряжения при любой степени стабилизации задающего устройства в системе управления возможны колебания частоты выходного напряжения, которые будут увеличиваться с уменьшением частоты напряжения синхронного генератора.

В синхронных системах управления имеется четкая фиксация между определенными точками кривых питающего и выходного напряжения НПЧ, что позволяет обеспечить идентичность полуволн выходного напряжения при высокой степени стабилизации его частоты.

Один из возможных путей реализации алгоритма управления, при котором система управления фиксирует моменты пересечения кривых фазных напряжений генератора (моментов начала естественной коммутации вентилей НПЧ), пояснен на примере структурной схемы, изображенной на рис. 2.

Фиксация моментов начала естественной коммутации вентилей и выработка начинающихся в этих точках синхронизирующих импульсов осуществляются синхронизатором импульсов СИ, подключенным к выходным зажимам синхронного генератора.

Первый из этих импульсов запускает выполненный на базе одновибратора задающий генератор ЗГ, который, отрабатывая определенное время, возвращается в исходное состояние. Обратная связь с выхода ЗГ на вход логического элемента «&» разрешает новое включение ЗГ в следующий момент появления импульса на выходе СИ. В течение интервала включенного состояния ЗГ выходные импульсы СИ влияния на работу

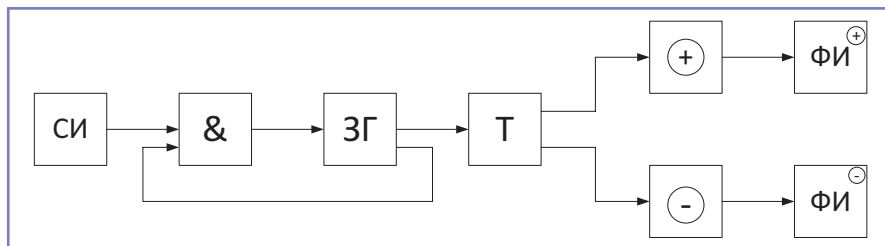


Рис. 2. Структурная схема синхронной системы управления НПЧ

ЗГ не оказывают, поскольку вход ЗГ заблокирован запрещающим сигналом элемента «&». После пересчета триггером Т импульсы, разрешающие формирование полуволн выходного тока положительной (+) и отрицательной (-) полярности, поступают на входы соответствующих формирователей импульсов ФИ⁽⁺⁾ и ФИ⁽⁻⁾ для токосборных групп силовых цепей НПЧ.

Частота вращения вала дизеля и частота вращения вала связанного с ним синхронного генератора (частота входного напряжения НПЧ), как известно, на любой фиксированной позиции контроллера машиниста могут случайным образом отклоняться от номинального для данной позиции значения.

Частота выходного напряжения преобразователя в заданном диапазоне изменения напряжения частоты напряжения синхронного генератора может быть задана как

$$y = \varphi(x) = \begin{cases} \frac{2}{9}x & \text{при } x_m < x < x_n; \\ \frac{3}{14}x & \text{при } x_n < x < x_M, \end{cases} \quad (13)$$

где x_m и x_M – минимальная и максимальная частоты напряжения генератора на 10-й позиции контроллера; $x_m = 75$ Гц, $x_M = 79$ Гц;

x_n – частота «переключения», соответствующая переходу на смежную (следующую по пульсации) полуволну выходного напряжения, в данном случае от полуволны с 27 пульсациями к полуволне с 28 пульсациями; тогда $x_n = 76,5$ Гц.

В связи с тем, что частота напряжения генератора – случайная величина, характеризующая плотностью распределения $f_x(t)$, случайной будет и выходная частота y , как функция случайного аргумента. Определим закон и числовые характеристики распределения частоты выходного напряжения y , для чего представим частоту напряжения генератора как результат смешивания двух составляющих $x' < x_n$ и $x'' > x_n$ с вероятностями p' и $p'' = 1 - p'$, то есть

$$x = \begin{cases} x' & \text{с вероятностью } p'; \\ x'' & \text{с вероятностью } p'' = 1 - p', \end{cases} \quad (14)$$

где $x' < x_n < x''$;

$$p'' = p\{x < x_n\} = \int_{-\infty}^{x_n} f_x(t) dt. \quad (15)$$

Распределение отдельных составляющих частоты напряжения генератора

является в этом случае усечением полного распределения этой частоты. Плотности $f_{x'}(t)$ и $f_{x''}(t)$ найдем на основании известных соотношений [4]:

$$f_{x'}(t) = \begin{cases} \frac{1}{p'} f_x(t) & \text{нпу } t < x_n; \\ 0 & \text{нпу } t > x_n; \end{cases} \quad (16)$$

$$f_{x''}(t) = \begin{cases} \frac{1}{p''} f_x(t) & \text{нпу } t > x_n; \\ 0 & \text{нпу } t < x_n. \end{cases} \quad (17)$$

Частота выходного напряжения преобразователя также является результатом смешивания двух составляющих y' и y'' , то есть

$$y = \begin{cases} y' & \text{с вероятностью } p'; \\ y'' & \text{с вероятностью } p'' = 1 - p', \end{cases} \quad (18)$$

где $y' = \varphi(x')$, а $y'' = \varphi(x'')$.

С учетом соотношений (13) и (14) получим

$$y = \begin{cases} y' = \varphi(x) = \frac{2}{9}x' & \text{с вероятностью } p'; \\ y'' = \varphi(x'') = \frac{3}{14}x'' & \text{с вероятностью } p''. \end{cases} \quad (19)$$

Таким образом, мы представили каждую из составляющих выходной частоты в виде линейной функции соответствующей составляющей входной частоты. Законы распределения составляющих частоты выходного напряжения НПЧ можно определить как распределение линейной функции случайного аргумента [5]:

$$\begin{aligned} f_{y'}(t) &= \frac{9}{2} f_{x'}\left(\frac{9}{2}t\right) = \\ &= \begin{cases} \frac{9}{2p'} f_{x'}\left(\frac{9}{2}t\right) & \text{нпу } t < \frac{2}{9}x_n; \\ 0 & \text{нпу } t > \frac{2}{9}x_n; \end{cases} \quad (20) \\ f_{y''}(t) &= \frac{14}{3} f_{x''}\left(\frac{14}{3}t\right) = \\ &= \begin{cases} \frac{14}{3p''} f_{x''}\left(\frac{14}{3}t\right) & \text{нпу } t > \frac{3}{14}x_n; \\ 0 & \text{нпу } t < \frac{3}{14}x_n. \end{cases} \quad (21) \end{aligned}$$

Результирующий закон распределения частоты выходного напряжения в соответствии с (18) можно представить в виде

$$f_y(t) = p' f_{y'}(t) + p'' f_{y''}(t). \quad (22)$$

Дисперсию D_y определим по известному соотношению

$$D_y = M_y - m_y^2, \quad (23)$$

где M_y – математическое ожидание квадрата частоты входного напряжения или, иначе, ее второй начальный момент;

m_y – математическое ожидание этой частоты.

На основании теоремы о полном математическом ожидании запишем

$$m_y = p' m_{y'} + p'' m_{y''}; \quad (24)$$

$$M_y = p' M_{y'} + p'' M_{y''}; \quad (25)$$

где $m_{y'}, m_{y''}, M_{y'}, M_{y''}$ – математические ожидания и вторые начальные моменты составляющих y' и y'' частоты выходного напряжения.

Поскольку составляющие этой частоты являются линейными функциями соответствующих составляющих частоты напряжения генератора, то названные выше числовые характеристики составляющих частоты выходного напряжения преобразователя можно выразить через соответствующие числовые характеристики составляющих частоты напряжения генератора:

$$m_{y'}' = \frac{2}{9} m_{x'}; \quad (26)$$

$$m_{y''}'' = \frac{3}{14} m_{x''}''; \quad (27)$$

$$M_{y'}' = \left(\frac{2}{9}\right)^2 M_{x'}'; \quad (28)$$

$$M_{y''}'' = \left(\frac{3}{14}\right)^2 M_{x''}''; \quad (29)$$

Числовые характеристики составляющих частоты напряжения генератора выразим через плотность распределения этой частоты:

$$m_{x'}' = \int_{-\infty}^{\infty} t f_{x'}(t) dt = \frac{1}{p'} \int_{-\infty}^{x_n} t f_x(t) dt; \quad (30)$$

$$M_{x'}' = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 f_{x'}(t) dt = \frac{1}{p'} \int_{-\infty}^{x_n} t^2 f_x(t) dt; \quad (31)$$

$$m_{x''}'' = \frac{1}{p''} \int_{x_n}^{\infty} t f_x(t) dt; \quad (32)$$

$$M_{x''}'' = \frac{1}{p''} \int_{x_n}^{\infty} t^2 f_x(t) dt. \quad (33)$$

Таким образом, для определения закона и числовых характеристик распределения частоты выходного напряжения преобразователя на любой позиции контроллера машиниста необходимо знать плотность распределения частоты напряжения синхронного генератора на этой позиции контроллера.

Выводы

Поскольку уровень и частота выходного напряжения преобразователя частоты систем централизованного электроснабжения пассажирских поездов от автономных локомотивов являются случайными величинами, для анализа стабильности выходного напряжения по этим параметрам целесообразно применять теоретико-вероятностные методы.

На примере многофазно-однофазного непосредственного тиристорного преобразования частоты проанализирована стабильность его выходного напряжения применительно к системе централизованного электроснабжения магистральных пассажирских поездов.

Литература

1. Антюхин В.М., Богомяков А.А., Евсеев Ю.А. и др. Устройство силовой электроники железнодорожного подвижного состава: учеб. пособие / под ред. Ю.М. Инькова и Ф.И. Ковалева. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2001. – 471 с.

2. Исаев И.П., Иньков Ю.М., Маричев М.А. Вероятностные методы расчета полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергоиздат, 1983. – 93 с.

3. Григорьев Ю.П., Иньков Ю.М., Иоспа З.С., Феоктистов В.П. Проблема централизованного электроснабжения пассажирских поездов при электрической и тепловозной тяге // Электричество, 1971, № 6.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – Физматгиз, 1962.

5. Хан Г., Шапиро С. Статистические методы в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969.

Иньков Юрий Моисеевич

Родился в 1937 году. В 1954 году окончил Московский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Инженер – электромеханик путей сообщения». Доктор технических наук, профессор. В 1978 году защитил диссертацию по теме «Вероятностные методы расчета полупроводниковых преобразователей электроэнергии». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время – профессор кафедры «Электрическая тяга» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). Имеет более 200 научных трудов, в том числе монографии, и более 100 авторских свидетельств и патентов. Заслуженный деятель науки РФ, имеет 5 государственных наград, знаки «Почетный работник транспорта России» и «Почетный железнодорожник».

Сачкова Елена Владимировна

Родилась в 1976 году. В 1998 году окончила

Пензенский государственный педагогический университет по специальности «Филология». Кандидат филологических наук, доцент. Опыт работы – 18 лет. В настоящее время работает заведующей кафедрой «Иностранные языки – 4» МГУПС (МИИТ). Имеет 17 научных трудов.

In'kov Yuriy

Was born in 1937. In 1954 he graduated from Moscow Institute of Railway Transport Engineers, speciality is «Railway transport engineer – electrician». He is a Doctor of Engineering, a professor. In 1978 he defended a thesis, the theme is «Probabilistic computing methods of power semiconductor converters». He has 50 year work experience. At present he works as a professor of «Electric traction» department of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT). He has more than 200 scientific works, including monographs and more than 100 author's certificates and patents. He is a Honored scientist of Russia, he has 5 state awards, «Honored transport worker of Russia» and «Honored railway worker» signs.

Sachkova Elena

Was born in 1976. In 1998 she graduated from Penza state pedagogical University with specialization in «Philology». She is candidate of philological sciences, associate professor. She has 18 years of work experience. At present she is head of «Foreign languages – 4» department of Moscow State University of Railway Engineering. She has 17 scientific works.

К вопросу применения имитационных моделей движения для исследования эффективности рекуперативного торможения в метрополитенах

// The issue of implemenation movement simulation models to investigate the effectiveness of regenerative braking in the underground railways //

Веселов П.А.,
НИУ «МЭИ», г. Москва

В статье рассматривается вопрос применения имитационного моделирования движения электропоездов метрополитенов для оценки эффективности рекуперативного торможения, в том числе оценки возможности межпоездного обмена на данном виде транспорта, в частности, в условиях энергосберегающих графиков движения.
Ключевые слова: рекуперативное торможение, метрополитен, имитационное моделирование движения, модели движения.

The article discusses implementation of electric trains movement simulation for the effectiveness of regenerative braking in underground railways evaluation, including evaluating the possibility of exchange between consecutive trains, and energy saving schedules.
Keywords: regenerative brake, underground railways, train motion modeling, modeling train movements.

Существующие данные о расчетных и опытных испытаниях в области применения рекуперативного торможения (РкТ) на электроподвижном составе (ЭПС) сводятся к примерно одинаковым показателям эффективности РкТ на данном виде транспорта. В таблице 1 представлен сравнительный анализ полученных результатов сокращения энергопотребления при различных способах реализации рекуперированной ЭПС энергии – межпоездном обмене стационарных и бортовых накопительных устройств (НЭ). Однако имеющиеся данные часто указывают на диапазон или на предельное достигаемое значение показателя эффективности, отбрасывая

реальные значения при эксплуатации. Крайне важно при проведении эксперимента или моделирования учитывать не потенциально достижимый в режиме «Пуск – торможение» результат, а реальные показатели при эксплуатации в обычных режимах работы.

Для метрополитенов Российской Федерации вопросы применения РкТ относятся скорее к отдельным фактам, в том числе опытным и экспериментальным, чем к повсеместной полноценной реализации. Отдельно следует отметить, что достижение наибольших технико-экономических показателей при эксплуатации ЭПС в современных реалиях должно сопровождаться соблюдением

нескольких обязательных условий, в числе которых:

- энергоэффективный тяговый электропривод [9, 10];
- энергоэффективные графики движения;
- применение РкТ.

Для реализации совокупности данных условий в целях достижения показателей максимальной энергоэффективности ЭПС предлагается использовать проект модернизации наиболее массово эксплуатируемых вагонов метрополитена 81–717/14 с заменой реостатного контроллера на транзисторно-реостатный с IGBT и микропроцессорной системой управления и разработанную методику оценки эффективности применения РкТ с применением имитационных моделей движения ЭПС, предусматривающих возможность выбора энергоэффективных графиков движения для перегонов различной протяженности. Следует отметить, что проект модернизации предусматривает рекуперативно-реостатное торможение, в том числе как решение вопроса двойной тормозной мощности [7, 8].

С целью структуризации полученных результатов перегоны в описываемой методике подразделяются по протяженности на три группы: малый (до 1500 м), средний (от 1501 до 2500 м), большой

Таблица 1. Сравнение достигнутых/ожидаемых результатов испытаний рекуперативного торможения в метрополитенах различных стран

№	Место	Вид накопителя / межпоездной обмен	Полученный результат сокращения энергопотребления	Источник
1	Тяговая подстанция Т-23, Филевская линия московского метрополитена, г. Москва, Российская Федерация	Стационарный	13,4%	[1]
2	Метрополитен г. Лондона, Соединенное Королевство	Межпоездной обмен с возможностью возврата избыточной энергии рекуперации во внешнюю сеть	15%	[2]
3	Киевский метрополитен, г. Киев, Украина	Межпоездной обмен	5–25%	[3]
4	Метрополитен г. Осаки, Япония	Стационарный	25–40%	[4]
5	Метрополитен г. Гамбурга, Германия	Бортовой	25%	[5]
6	Метрополитен г. Москвы, Российская Федерация	Стационарный	8–26% в зависимости от линии	[6]

Таблица 2. Значения возможных отклонений от интервала движения вследствие различных факторов

Наименование фактора	Возможное время отклонения от нормы, с										
Фактор машиниста	-3	-2	-1	0	1	2	3				
Фактор пассажиров				0	1	2	3	4	5	6	7

Таблица 3. Моделирование отклонений от графиков движения на малом перегоне для 10 пар поездов

	Порядковый номер состава на линии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Движение в одну сторону	Наличие отклонения	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	Нет	Да
	Значение отклонения	2	0	-2	0	0	5	1	-1	0	6
Движение в другую сторону	Наличие отклонения	Нет	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Нет	Да
	Значение отклонения	0	0	5	0	-2	1	7	-1	0	-3
Порядковый номер состава на линии		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Движение в одну сторону		97	95	93	95	95	100	96	94	95	101
Движение в другую сторону		95	95	100	95	93	96	102	94	95	92

(2501 и более метров). Суть предложенной методики заключается в разработке имитационных моделей движения для ЭПС, в которых учитываются требования, предъявляемые к скорости сообщения, и удельный расход энергии в зонах различных скоростей движения с целью выбора наиболее оптимальных моделей движения ЭПС на конкретном перегоне. Также возможно оценить наличие потребителя для реализации энергии рекуперации в межпоездном обмене. Для этого учитывается смещение запланированных моделей движения относительно постоянства расписания вследствие человеческого фактора: ранний или поздний старт машинистом (фактор машиниста) и задержка закрытия дверей из-за пассажиров (фактор пассажиров). Чрезвычайные ситуации и происшествия в данном примере не рассматриваются, однако при необходимости они также могут быть учтены. В таблице 2 приведены значения заданных возможных отклонений от интервалов движения в секундах. При этом моделирование наличия факторов, влияющих на отклонение по времени, проводится с использованием генератора случайных чисел. Для того чтобы описать вероятность наличия фактора машиниста или фактора пассажиров, задаются соответствующие вероятности в зависимости от загруженности линии, индивидуальных особенностей машиниста, статистики и т.д. В приведенном в таблице 3 примере это 50% для фактора машиниста и 30% для фактора пассажиров.

Из-за бесконечного количества вариантов с изменениями кривых движения со смещением графика методика ориен-

тирована в первую очередь на скорость сообщения. Однако применяемая методика позволяет провести анализ поведения ЭПС при индивидуальной модели движения для каждого ЭПС, например, с учетом индивидуальных особенностей модели вождения каждого машиниста либо особенностей конкретного ЭПС.

При исследовании вероятности реализации энергии РкТ на межпоездной обмен учитываются также интервалы движения между поездами встречных направлений, так как данный фактор непосредственно влияет на достоверность полученных результатов. Для удобства диаграммы движения ЭПС можно представить в графическом виде с отображением соответствующих режимов движения по времени. На рис. 1 представлена диаграмма для перегона малой длины с базовым значением интервала между поездами

встречных направлений, составляющим 30 секунд, базовый интервал при движении в одном направлении – 95 с, что соответствует 38 парам поездов в час.

Обращая внимание на РкТ как на потенциальное решение проблемы снижения нагрузки на контактную сеть метрополитена, важно отметить несколько моментов:

- рекуперативно-реостатное торможение предусматривает дополнительные потери и препятствует максимальному технико-экономическому эффекту от реализации РкТ;

- опираясь на данные, полученные в результате исследования имитационных моделей, можно сделать вывод об отсутствии постоянной возможности реализации энергии рекуперации в межпоездном обмене;

- мощность высвобождаемой энергии при рекуперативном торможении одного состава может оказаться выше, чем мощность, потребляемая другим составом, при этом возникает так называемая избыточная рекуперация;

- в случае нахождения двух и более составов в режиме РкТ в момент времени, когда отсутствуют потребители, энергию РкТ придется «сжигать» на реостатах, так как возможности принять эту энергию у контактной сети нет;

- потери, возникающие при передаче энергии от ЭПС в режиме РкТ до состава в режиме тяги (а в случаях с передачей энергии в соседние секции данное расстояние может достигать нескольких километров), могут сделать нецелесообразным (падение напряжения, тепловые потери) межпоездной обмен, однако данный вопрос требует отдельного изучения.

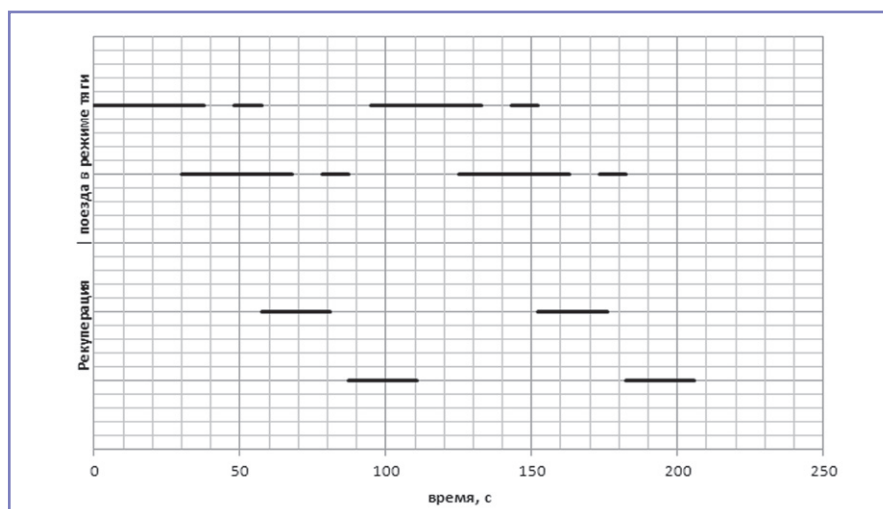


Рис. 1. Диаграмма режимов движения при интервале между поездами встречных направлений, составляющем 30 секунд

Тогда теоретически наиболее перспективным техническим решением, предусматривающим максимальный экономический эффект от РкТ, является установка на ЭПС НЭ бортового исполнения, позволяющая решить две принципиальные задачи:

- регулярное и бесперебойное использование энергии рекуперации, в том числе с целью высвобождения мощностей для повышения комфортности пассажиров (таких как, например, установка кондиционеров на ЭПС). При этом минимизируются потери при передаче энергии, в том числе на существенные расстояния, так как в метрополитене контактная сеть постоянного тока;

- повышение безопасности метрополитена, так как бортовой НЭ дает запас автономности хода, что может являться единственной возможностью энергоснабжения в аварийных условиях.

Отдельной задачей является повсеместное применение энергосберегающих графиков движения в метрополитене, фактически речь идет о применении имитационного моделирования движения по различным перегонам с учетом длины перегона, профиля пути, тяговых характеристик конкретных ЭПС, очередности движения различных ЭПС с целью выбора оптимальной модели движения для различных перегонов с соответствующими рекомендациями для машинистов. Важной составляющей подобной работы является принципиальная необходимость имитационного моделирования для решения задач реализации системы автоведения в метрополитенах. При этом выбор наиболее оптимального режима движения позволяет увеличить потенциальную роль РкТ в повышении энергоэффективности не только метрополитена как вида транспорта, но и любого электрического транспорта в принципе. Изучая вопросы энергоэффективности графиков движения, следует обратить внимание также на опыт железнодорожного транспорта [11], где подобная проблема более подробно изучена и рекомендации сформированы. В совокупности с известными рекомендациями по улучшению энергетических показателей ЭПС существует вероятность принципиального повышения энергоэффективности метрополитенов в Российской Федерации при повсеместном учете имитационного моделирования, в том числе на базе методики оценки, описанной в настоящей работе. Если рассматри-

вать вопрос в масштабах городской энергосистемы, то перечисленные проблемы и предложенные решения относятся к энергосбережению в городских энергосистемах, а следовательно, и конечные технико-экономические показатели эффективности зависят от востребованности освобождаемой мощности как для самого метрополитена, так и для городской энергосистемы, в том числе можно говорить о возможном снижении объемов генерации и конечной экономии энергоресурсов (энергоносителей), что несомненно приведет к положительному влиянию на экономику нашей страны.

Выводы

Имитационные модели движения и методику оценки эффективности применения РкТ возможно использовать как для теоретических исследований, так и для полноценного моделирования при эксплуатации метрополитенов, в том числе для новых поколений перспективных систем автоведения.

Результаты имитационного моделирования для проекта модернизации вагонов 81-717/14 подтвердили эффективность РкТ, однако условием эффективности является применение НЭ в качестве потребителя энергии рекуперации.

Реализация энергии рекуперации в межпоездном обмене может рассматриваться только на перегонах малой длины, для средних и больших перегонов совпадение режима рекуперации одного ЭПС и режима тяги другого ЭПС, а равно и наличия потребителя, маловероятно.

Введение единой методики оценки эффективности применения РкТ, в том числе на стадии образовательного процесса, позволит объективно оценить расчетные и экспериментальные результаты, полученные в различных исследованиях. Это крайне важно для сравнения и оценки полученных данных для разных типов ЭПС.

Для достижения максимального технико-экономического эффекта от применения РкТ в метрополитене требуется применение НЭ. Наиболее эффективный вид накопителя, а именно бортового исполнения или стационарного, предполагается выбирать из соответствующих технических решений и возможности их эксплуатации в конкретном метрополитене и с конкретным ЭПС.

Говорить об энергоэффективности при применении РкТ в метрополитене возможно только с целью уменьшения

затрат энергоресурсов для генерации электроэнергии для функционирования конечных потребителей. При высвобождении свободной электроэнергии без необходимости ее потребления другим потребителем или понижения уровня генерации (и, как следствие, экономии энергоресурсов) речь идет не об энергосбережении, а о перераспределении конечного счета за электроэнергию.

Литература

1. Гречишников В.А., Шевлюгин М.В. Эксплуатация накопителя электроэнергии на метрополитене // Мир транспорта, № 5. – М., 2013.
2. Ян Хардер. Партнерство транспортных компаний и университетов – ключ к инновационному развитию // Мир транспорта, № 1. – М., 2015.
3. Joel Hruska. Philadelphia unveils new hybrid subway trains that use Prius-like regenerative braking to feed energy back into the grid // Информационный портал Extremetech [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.extremetech.com/extreme/180636-philadelphia-unveils-new-hybrid-subway-system-that-uses-prius-like-regenerative-braking-to-feed-energy-back-into-the-grid].
4. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Электронный журнал по энергосбережению «Энергосовет» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?id=185].
5. Стационарные накопители энергии на метрополитене Гамбурга // Железные дороги мира, № 7. – М., 2010.
6. Мелешин И. Эксплуатация накопителя электроэнергии на метрополитене // Энергоэффективность и энергосбережение, № 7–8. – М., 2013, с. 65–67.
7. Веселов П.А. Выбор решений для модернизации цепей управления двигателей метровагонов // Мир транспорта, № 5 (60). – М., 2015.
8. Веселов П.А., Тулупов В.Д. Оценка возможностей улучшения эксплуатационных показателей поездов метрополитена // Электротехника, ЗАО «Знак», № 5. – М., 2015.
9. Тулупов В.Д., Кирихин Ю.А., Марченков А.П. и др. Возможность резкого улучшения энергетических показателей электропоездов // Железнодорожный транспорт, № 6, 2003.
10. Тулупов В.Д. Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями // Сборник «Электросила», выпуск 41. – СПб., 2002.
11. Виноградов С.А., Кирихин В.Ю., Анфиногенов А.Ю. Прогнозные энергосберегающие графики движения поездов // Железнодорожный транспорт, № 8, 2011.

Веселов Павел Александрович

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Национальный исследовательский университет «МЭИ» по специальности «Инженер электрического транспорта». Опыт работы – 3 года. В настоящее время является аспирантом НИУ «МЭИ». Имеет 3 научные работы.

Veselov Pavel

Was born in 1989. In 2012, he graduated from National research university «MPEI» with specialization in «Electric transport engineer». He has 3 years of work experience. At present, he is postgraduate student of National research university «MPEI». He has 3 scientific works.

Перспективы применения многофазных машин переменного тока

// Perspectives of Multi-phase AC machines //

**Терешкин В.М., к.т. н., доцент,
Уфимский государственный авиационный технический университет,
г. Уфа**

**Гришин Д.А.,
ООО «Башуралтехсервис», г. Уфа**

**Макулов И.А.,
ООО «Газ-Проект-Инжиниринг», г. Уфа**

Установлено, что при равенстве величин фазных токов трех- и пятифазной машин переменного тока число витков в фазе пятифазной машины должно быть меньше в 5/3 раза. При выполнении этих условий трех- и пятифазная обмотки создают равновеликую намагничивающую силу при одинаковом количестве меди. Индуктивность коммутируемых фаз пятифазной машины уменьшается, что упрощает коммутацию ключей. Уменьшение числа витков в фазе пятифазной обмотки также приводит к ослаблению реакции якоря. Увеличивается диапазон регулирования пятифазной машины по сравнению с трехфазной. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретические исследования.
Ключевые слова: пятифазная синхронная машина, пятифазный преобразователь, коммутация силовых ключей, реакция якоря, диапазон регулирования частоты вращения.

It found that at equal values of the phase currents and three-phase AC machines, the number of turns in the five-phase machine phase should be less than 5/3 times. Under these conditions, three- and five-phase winding, creating equal-magnetizing force for the same amount of copper. Inductance switched phase five-phase machine is reduced, which simplifies the switching keys. Reducing the number of turns in the five-phase winding phase also leads to weakening of the armature reaction. Five-phase control range is increased in comparison with the machines of three-phase machine. The results of experimental studies, confirming theoretical studies.

Keywords: three-phase synchronous machine, single-phase inverter, switching power switches, anchor reaction control speed range.

Современный уровень развития силовой электроники и информационных технологий, позволяющий решать сколь угодно сложные задачи управления в области преобразовательной техники, предоставляет возможность создания многофазных электромеханических систем на основе многофазных синхронных и асинхронных машин переменного тока. В настоящее время, например, уже находит применение тяговый электропривод постоянного тока на основе четырехфазного асинхронного двигателя с векторным управлением. Электропривод установлен на отечественном электровозе «Гра-

нит», разработчик – фирма «Сименс» [1]. Фирма Bosh разработала и подготовила к серийному производству пятифазный вентильный синхронный генератор для автомобилей. Генератор выгодно отличается пониженным уровнем шума и удельными характеристиками [2]. Существует значительное количество теоретических разработок в области многофазных электромеханических систем [3–6].

Данная работа посвящена сравнительному анализу пятифазной и трехфазной электромеханических систем и изучению перспектив применения многофазных двигателей.

Реализация многофазной электрической машины не требует дополнительных затрат по сравнению с трехфазной машиной. Расход меди остается неизменным, магнитная система не меняется, изготовление в технологическом плане не усложняется. К недостаткам на первый взгляд можно отнести увеличение числа силовых ключей преобразователя (одна диагональ на фазу).

Обоснуем тезис «Расход меди остается неизменным».

Известно, что результирующая намагничивающая сила в воздушном зазоре в первом приближении определяется выражением $F = m \cdot w \cdot I$, где m – количество фаз машины, w – количество витков в фазе, I – величина тока в фазе обмотки.

Если машину выполнить с количеством фаз, например, $m = 5$, то при неизменном токе в фазе I необходимо уменьшить количество витков в фазе пятифазной обмотки в 5/3 раза. Это необходимо для того, чтобы оставить неизменной величину намагничивающей силы в воздушном зазоре по сравнению с трехфазной системой. При этом общая длина медного провода по сравнению с трехфазной обмоткой не изменится, сечение провода остается прежним, тепловой режим также не меняется.

Проведем сравнительный анализ трех- и пятифазной обмоток машины переменного тока, которые создают равные по величине намагничивающие силы, но при этом количество витков в фазе пятифазной обмотки w_5 равно числу витков в фазе трехфазной обмотки w_3 . Учитывая, что результирующая намагничивающая сила определяется выражением $F = m \cdot w \cdot I$, где m – количество фаз обмотки, w – количество витков в фазе, I – ток, протекающий по фазе, фазный ток пятифазной обмотки должен быть меньше, чем фазный ток трехфазной обмотки в 5/3 раза. Предполагается, что токи трех- и пятифазной обмоток имеют синусоидальную форму.

Общая длина медного провода пятифазной обмотки возрастает в 5/3 раза. Сечение провода можно уменьшить в 5/3 раза, не ухудшая тепловой режим обмотки, так как тепловая мощность определяется выражением $P = I^2 \cdot R$ (ток уменьшается 5/3 раза, а общее сопротивление медного провода R пятифазной обмотки возрастает в $(5/3)^2$). В результате, по сравнению с трехфазной обмоткой, тепловой режим пятифазной обмотки не меняется, количество меди остается неизменным.

Предположение синусоидальности распределения позволяет представить намагничивающие силы (или пропорциональные им токи) обобщенным вектором на комплексной плоскости, то есть вектором, представляющим собой геометрическую сумму отрезков, построенных на пространственных осях фазных обмоток. Отрезки соответствуют мгновенным значениям фазных намагничивающих сил (или пропорциональных им фазных токов). Коэффициент пропорциональности – число витков в фазе.

При симметричной трехфазной системе обмоток обобщенный вектор тока можно представить в виде

$$\underline{i} = \frac{2}{3} (i_a + i_b \underline{A} + i_c \underline{A}^2), \quad (2)$$

где $\underline{A} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$
и $\underline{A}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – операторы поворота, а i_a, i_b, i_c – мгновенные значения токов соответствующих фаз трехфазной обмотки.

При таком представлении фазные токи i_a, i_b, i_c можно рассматривать как проекции обобщенного вектора $\underline{i}$ на соответствующие оси фазных обмоток, как изображено на рис. 1а. Если произвести построение вектора $\underline{i}$, откладывая значения фазных токов i_a, i_b, i_c на осях обмоток (рис. 1б), то суммарный вектор окажется в 3/2 раза больше того вектора, проекции которого соответствуют фазным токам. Поэтому в выражении (2) присутствует коэффициент 2/3, приводящий модуль суммарного вектора к такому значению, которое при проецировании на оси фазных обмоток даст истинные значения фазных токов. Фазные токи нулевой последовательности не учитываются.

При симметричной пятифазной системе обобщенный вектор тока можно представить в виде

$$\underline{i} = \frac{2}{5} (i_a + i_b \underline{A} + i_c \underline{A}^2 + i_d \underline{A}^3 + i_e \underline{A}^4), \quad (3)$$

где $\underline{A} = e^{j72^\circ} = \cos 72^\circ + j \sin 72^\circ$,
 $\underline{A}^2 = e^{j144^\circ} = -\cos 36^\circ + j \sin 36^\circ$,
 $\underline{A}^3 = e^{j216^\circ} = -\cos 36^\circ - j \sin 36^\circ$,
 $\underline{A}^4 = e^{j288^\circ} = \cos 72^\circ - j \sin 72^\circ$ – операторы поворота, а i_a, i_b, i_c, i_d, i_e – мгновенные значения токов соответствующих фаз пятифазной обмотки.

При таком представлении фазные токи i_a, i_b, i_c, i_d, i_e можно рассматривать как проекции обобщенного вектора $\underline{i}$ на соответствующие оси фазных обмоток, как изображено на рис. 2а. Если произвести построение вектора $\underline{i}$, откладывая значения фазных токов i_a, i_b, i_c, i_d, i_e на осях обмоток (рис. 2б), то суммарный вектор окажется в 5/2 раза больше того вектора, проекции которого соответствуют фазным токам. Поэтому в выражении (3) присутствует коэффициент 2/5, приводящий модуль суммарного вектора к такому значению, которое при проецировании на оси фазных обмоток даст истинные значения фазных токов для пятифазной системы. Фазные токи нулевой последовательности также не учитываются.

Сравнивая обобщенные векторы тока $\underline{i}$ трехфазной и пятифазной систем, можно сделать вывод, что векторы равны в том случае, если фазные токи пятифазной системы в 3/5 раза меньше фазных токов трехфазной системы. Этот же вывод может быть сформулирован в следующем виде: для формирования равновеликой намагничивающей силы при равенстве фазных токов трехфазной и пятифазной систем количество витков в фазе пятифазной обмотки должно быть меньше в 3/5 раза.

Тезис «Магнитная система остается неизменной» подтверждается тем, что в пакет статора, предназначенный для трехфазной обмотки, может быть уложена пятифазная обмотка (с неизменным количеством меди и при неизменном тепловом режиме). На рис. 3 представлена схема пятифазной обмотки синхронной машины $P = 2$, которая реализована на базе генераторной компоненты электромашиного преобразователя ПТ-500ЦМ. Вместо трехфазной обмотки в пакет статора уложена пятифазная обмотка. На рис. 4 представлена звезда намагничивающих сил фаз пятифазной обмотки.

На рис. 5 представлены схема фазы трехфазной обмотки и схема фазы пятифазной обмотки. Количество катушек

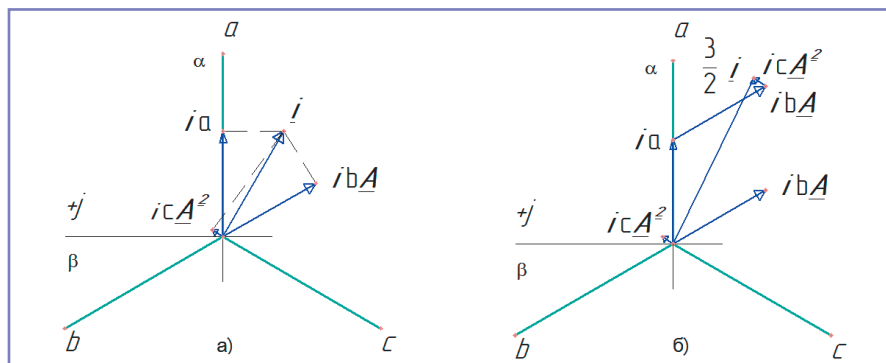


Рис. 1. Разложение обобщенного вектора $\underline{i}$ на фазные проекции (а) и построение обобщенного вектора по фазным проекциям для трехфазной системы (б)

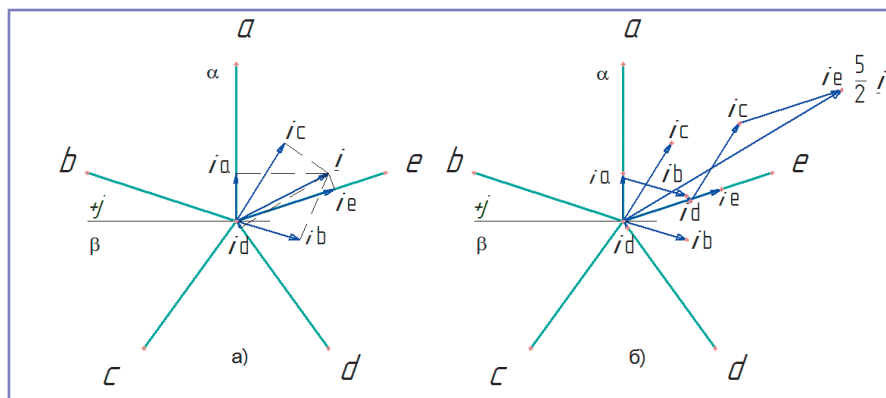


Рис. 2. Разложение обобщенного вектора тока $\underline{i}$ на фазные проекции (а) и построение обобщенного вектора по фазным проекциям для пятифазной системы (б)

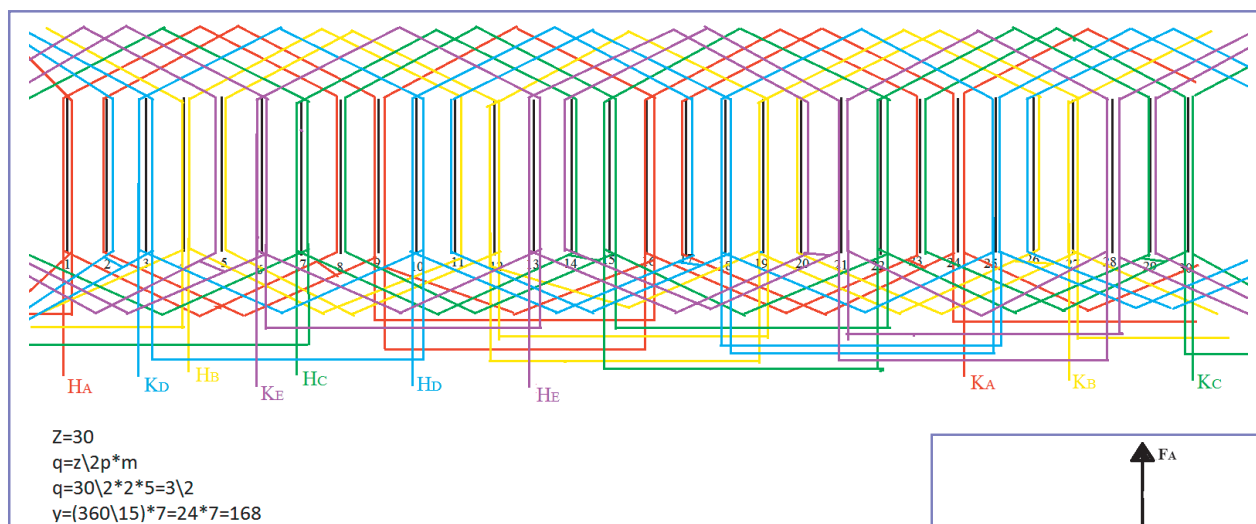


Рис. 3. Схема пятифазной обмотки

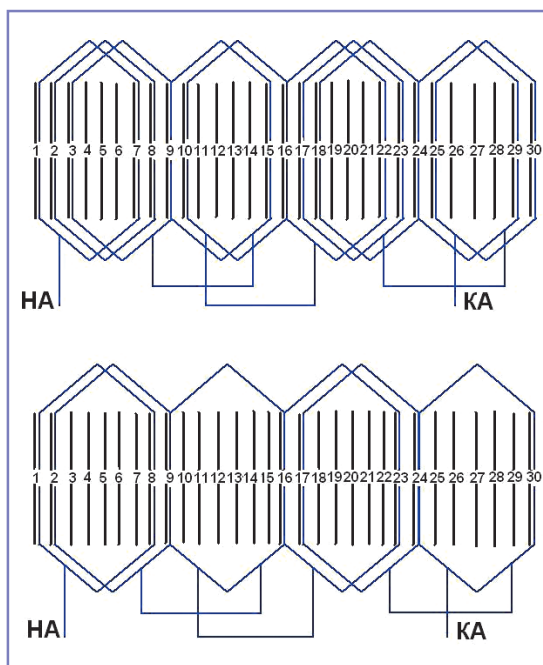


Рис. 5. Схемы фазы для трех- и пятифазных обмоток

в фазе трехфазной обмотки в $5/3$ раза больше, чем количество катушек в фазе пятифазной обмотки (10 катушек в фазе у трехфазной обмотки ($q_{3ф} = Z/2Pm = 2,5$) и 6 катушек в фазе у пятифазной обмотки ($q_{5ф} = Z/2Pm = 1,5$)). Количество витков в катушке одинаково, следовательно, индуктивность фазы у пятифазной обмотки меньше по сравнению с индуктивностью фазы трехфазной обмотки в $(5/3)^2$.

Функциональная схема пятифазной электромеханической системы представлена на рис. 6, а фотография ее макетного образца — на рис. 7.

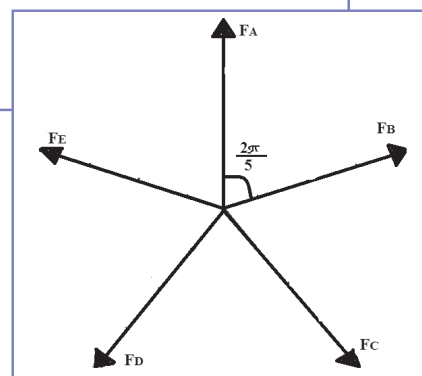


Рис. 4. Звезда намагничивающих сил фаз пятифазной обмотки

Для создания преобразователем симметричного пятифазного напряжения с временным сдвигом фаз, составляющим 72 градусов, необходимы десять коммутаций ключей за период в определенной последовательности. Длительность коммутации определяет частоту. Если симметричную пятифазную обмотку подключить к симметричному пятифазному напряжению, возникнет вращающееся магнитное поле. Графически это будет представлено как вращающийся вектор. Последовательность коммутаций у пятифазного преобразователя может быть пятиключевой, четырехключевой, трехключевой и двухключевой. Номера ключей соответствуют рис. 6.

Пятиключевые последовательности:

- 1) 1, 4, 6, 7, 9; 1, 4, 6, 8, 9; 1, 3, 6, 8, 9; 1, 3, 6, 8, 10; 1, 3, 5, 8, 10; 2, 3, 5, 8, 10; 2, 3, 5, 7, 10; 2, 4, 5, 7, 10; 2, 4, 5, 7, 9; 2, 4, 6, 7, 9;
- 2) 1, 4, 6, 7, 10; 1, 4, 5, 8, 9; 2, 3, 6, 8, 9; 1, 3, 6, 7, 10; 1, 4, 5, 8, 10; 2, 3, 5, 8, 9; 2, 3, 6, 7, 10; 1, 4, 5, 7, 10; 2, 4, 5, 8, 9; 2, 3, 6, 7, 9;
- 3) 1, 4, 6, 8, 10; 1, 3, 5, 8, 9; 2, 3, 6, 8, 10; 1, 3, 5, 7, 10; 2, 4, 5, 8, 10; 2, 3, 5, 7, 9; 2, 4, 6, 7, 10; 1, 4, 5, 7, 9; 2, 4, 6, 8, 9; 1, 3, 6, 7, 9.

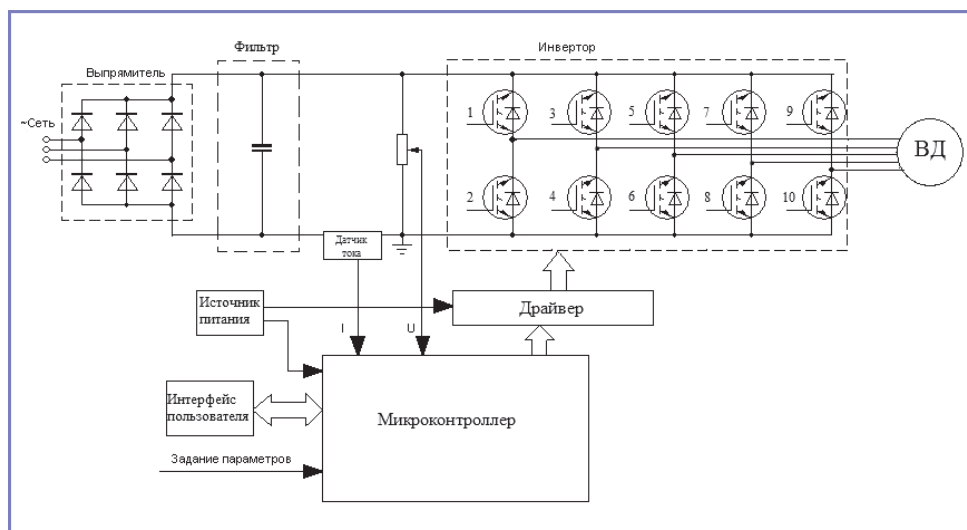


Рис. 6. Функциональная схема пятифазной электромеханической системы

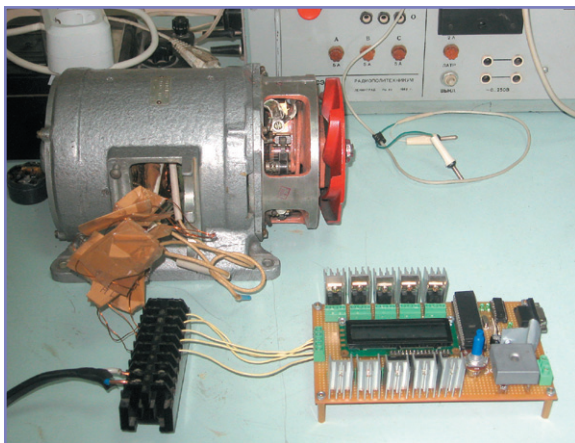


Рис. 7. Макетный образец пятифазной электромеханической системы

Четырехключевая последовательность:

1, 4, 6, 7; 1, 4, 8, 9; 3, 6, 8, 9; 1, 3, 6, 10; 1, 5, 8, 10; 2, 3, 5, 8; 2, 3, 7, 10; 4, 5, 7, 10; 2, 4, 5, 9; 2, 6, 7, 9.

Трехключевая последовательность:

1, 6, 8; 1, 3, 8; 3, 8, 10; 3, 5, 10; 2, 5, 10; 2, 5, 7; 2, 4, 7; 4, 7, 9; 4, 6, 9; 1, 6, 9.

Двухключевая последовательность:

9, 6; 1, 6; 1, 8; 3, 8; 3, 10; 5, 10; 5, 2; 7, 2; 7, 4; 9, 4.

Рассмотрим формирование результирующего вращающегося вектора тока при первой пятиключевой последовательности коммутаций. Если преобразователь подключен к пятифазному двигателю, результирующий вектор – это результирующий вектор намагничивающей силы в воздушном зазоре.

При коммутации 1, 4, 6, 7, 9 эквивалентная схема нагрузки имеет вид, пред-

ставленный на рис. 8а. Если модуль входного тока I_{BX} принять за единицу, то модули векторов А, D, Е равны 0,33, а модули и знак векторов В и С равны -0,5. В последующих рассуждениях также предполагается равенство единице входного тока I_{BX} . При суммировании векторов А, D, Е, - В, - С получается результирующий вектор тока 1, который имеет направление вектора Е, а его модуль равен 1,4, что представлено на рис. 8а.

При коммутации 1, 4, 6, 8, 9 эквивалентная схема нагрузки имеет вид, представленный на рис. 8б. Модули векторов А и Е равны 0,5, а модули и знак векторов В, С, D равны -0,33. При суммировании векторов А, Е, - В, - С, - D получается результирующий вектор 2, который имеет направление вектора - С, то есть сдвинут относительно вектора 1 на 36 градусов, а его модуль также равен 1,4, что представлено на рис. 8б.

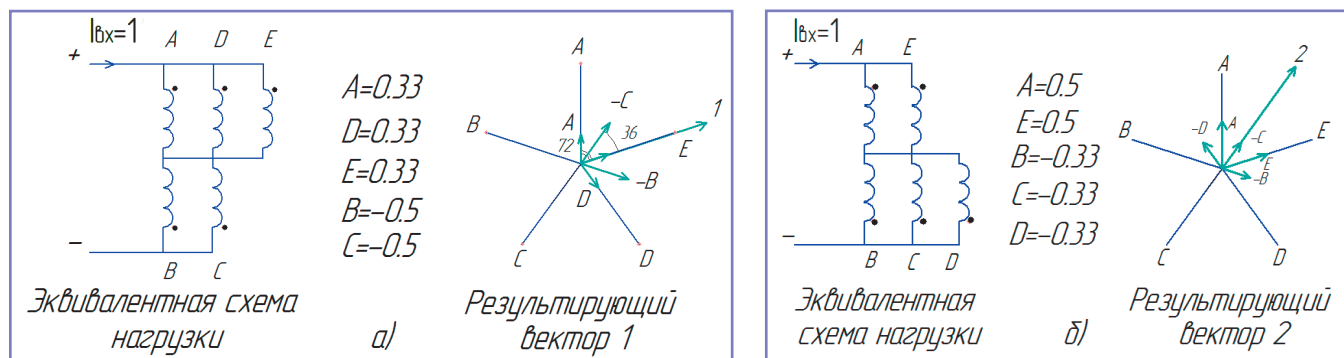


Рис. 8. Формирование вращающегося вектора

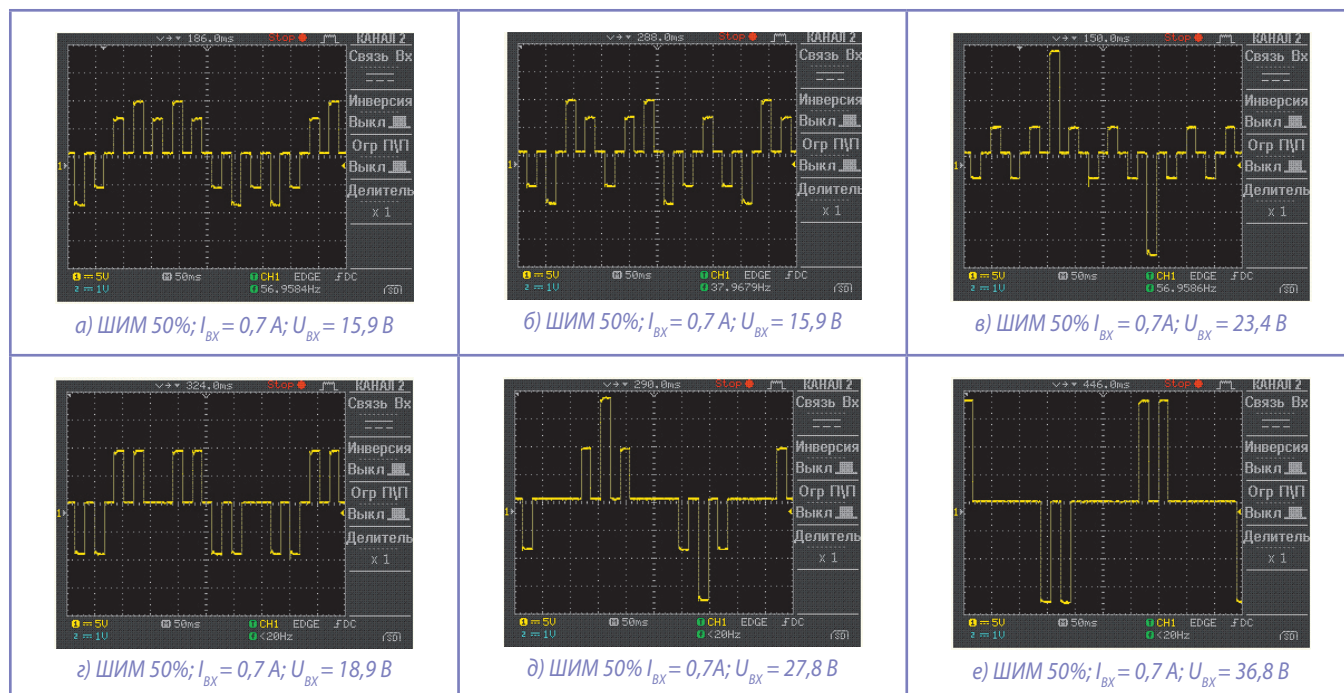


Рис. 9. Мгновенные значения токов при различных алгоритмах управления пятифазного преобразователя

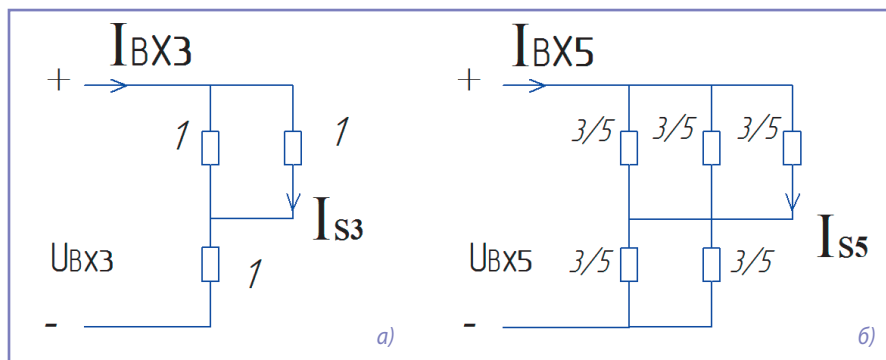


Рис. 10. Эквивалентные схемы трех- и пятифазных нагрузок при их подключении к источнику постоянного тока в момент коммутации

На рис. 9 (а–е) представлены мгновенные значения токов в одной из фаз пятифазной нагрузки при шести различных алгоритмах работы преобразователя. Осциллограммы сняты в одной размерности «Время – размах», ШИМ = 50%.

Осциллограммы тока получены на низкой частоте (до 1 Гц), поэтому реакция якоря практически отсутствует.

На рис. 10 представлены эквивалентные схемы трех- и пятифазной систем при их подключении к источнику постоянного тока в момент коммутации. Таких коммутаций (подключений) десять за период у пятифазной системы и шесть за период – у трехфазной системы. На низких частотах (до 5 Гц), когда реакция якоря проявляется слабо, обмотки электрических машин можно рассматривать как активные сопротивления, а режимы работы машин соответствуют пуску.

Определим, при каких значениях входных напряжений U_{BX3} и U_{BX5} в сопротивлениях $R_{\Phi3}$ и $R_{\Phi5}$ будут протекать равные по величине токи. Соотношение величин сопротивлений $R_{\Phi3}$ и $R_{\Phi5}$ соответствует соотношению активных сопротивлений обмоток трех- и пятифазной машин, то есть $(3/5) R_{\Phi3} = R_{\Phi5}$. Расчеты проводятся в относительных единицах.

Предположим $U_{BX3} = 1$ и $R_{\Phi3} = 1$. Тогда $I_{BX3} = 2/3$, так как $R_{S3} = 3/2$. R_{S3} – это суммарное входное сопротивление трехфазной нагрузки, которое формируется в момент коммутации и определяется выражениями в соответствии со схемой по рис. 10а

$$R_{S3} = (R_{S3})^1 + (R_{S3})^{11} = 3/2, \\ 1/(R_{S3})^1 = 1 + 1; (R_{S3})^1 = 1/2, \\ (R_{S3})^{11} = 1.$$

Форма мгновенного значения тока фазы трехфазной нагрузки, подключенной к трехфазному преобразователю, имеет вид, представленный на рис. 11а. Средневыпрямленное значение тока фазы трехфазной нагрузки определяет-

ся как площадь фигуры по рис. 11а выражением

$$I_{S3} = (2/3) (1/3) + (1/3) (2/3) = \\ = 2/9 + 2/9 = 4/9 = 0,44.$$

Форма мгновенного значения напряжения фазы трехфазной нагрузки, подключенной к трехфазному преобразователю, имеет вид, представленный на рис. 11б. Средневыпрямленное значение напряжения фазы трехфазной нагрузки определяется как площадь фигуры по рис. 11б выражением

$$U_{S3} = (2/3) (1/2) (2/3) + (2/3) 1 (1/3) = \\ = 4/9 = 0,44.$$

При определении U_{S3} учитывается, что $R_{\Phi3} = 1$.

Предположим, что $U_{BX5} = 1$ и $R_{\Phi5} = 3/5$. Тогда $I_{BX5} = 2$, так как $R_{S5} = 1/2$. R_{S5} – входное сопротивление пятифазной нагрузки, которое формируется в момент коммутации и определяется в соответствии со схемой по рис. 10б выражениями

$$R_{S5} = (R_{S5})^1 + (R_{S5})^{11} = 1/2, \\ 1/(R_{S5})^1 = 1/(3/5) + 1/(3/5) + 1/(3/5); \\ (R_{S5})^1 = 1/5, \\ 1/(R_{S5})^{11} = 1/(3/5) + 1/(3/5); \\ (R_{S5})^{11} = 3/10.$$

Форма мгновенного значения тока фазы пятифазной нагрузки, подключенной к преобразователю, имеет вид, представленный на рис. 12а. Средневыпрямленное значение тока фазы пятифазной нагрузки определяется как площадь фигуры по рис. 12а выражением

$$I_{S5} = (2/3) (3/5) + (2/2) (2/5) = \\ = 2/5 + 2/5 = 4/5.$$

Форма мгновенного значения напряжения фазы пятифазной нагрузки, подключенной к инвертору, имеет вид, представленный на рис. 12б. Средневыпрямленное значение напряжения фазы пятифазной нагрузки определяется как площадь фигуры по рис. 12б выражением

$$U_{S5} = 2 (1/3) (3/5) (3/5) + 2 (1/2) (3/5) (2/5) = 12/25 = 0,48.$$

При определении U_{S5} учитывается, что $R_{\Phi5} = 3/5$, а $R_{\Phi3} = 1$.

Соотношения токов, напряжений и мощностей при равенстве входных напряжений сведены в таблицу 1.

Неравенство входных и выходных мощностей P_{BX3} и P_{S3} , а также P_{BX5} и P_{S5} объясняется тем, что P_{S3} и P_{S5} были рассчитаны по средневыпрямленным, а не по действующим значениям токов и напряжений.

Определим коэффициенты пересчета средневыпрямленного и

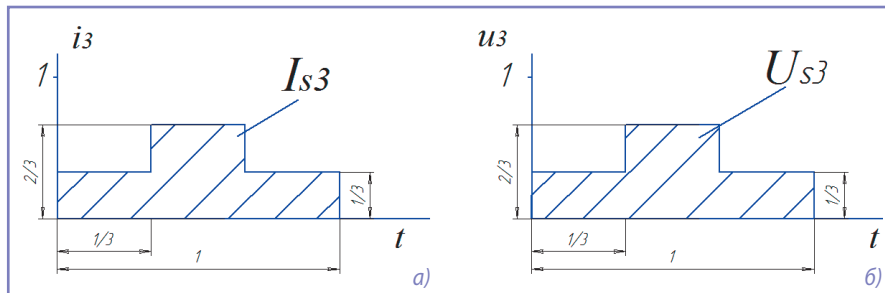


Рис. 11. Форма мгновенного значения тока и напряжения фазы трехфазной нагрузки

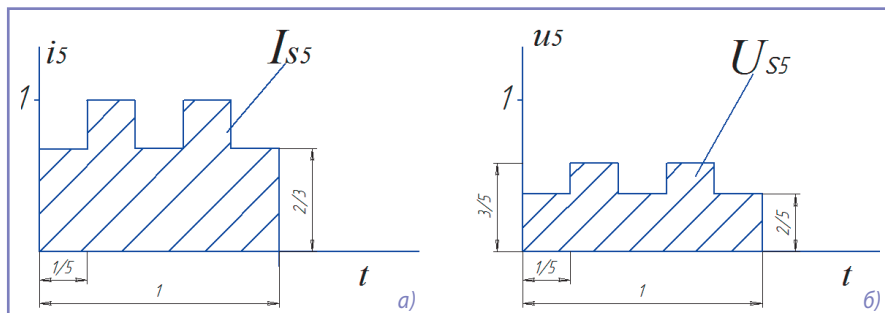


Рис. 12. Форма мгновенного значения тока и напряжения фазы пятифазной нагрузки

Таблица 1. Сравнение трехфазной и пятифазной систем при равенстве входных напряжений

Три фазы	Пять фаз
$U_{BX3} = 1$ $I_{BX3} = 2/3 = 0,66$ $P_{BX3} = U_{BX3} I_{BX3} = 2/3 = 0,66$ $P_{BX3} / P_{BX5} = (2/3) / 2 = 1/3$ $I_{S3} = 4/9 = 0,44$ $U_{S3} = 4/9 = 0,44$ $P_{S3} = 3 (4/9) (4/9) = 0,593$ $I_3 = (4/9) (1,06) = 0,471$ $U_3 = (4/9) (1,06) = 0,471$ $R_{\Phi3} = 1$	$U_{BX5} = 1$ $I_{BX5} = 2$ $P_{BX5} = U_{BX5} I_{BX5} = 2$ $P_{BX5} / P_{BX3} = 2 / (2/3) = 3$ $I_{S5} = 4/5 = 0,8$ $U_{S5} = 12/25 = 0,48$ $P_{S5} = 5 (4/5) (12/25) = 1,92$ $I_5 = (4/5) (1,02) = 0,816$ $U_5 = (12/25) (1,02) = 0,49$ $R_{\Phi5} = 3/5$

Таблица 2. Сравнение трехфазной и пятифазной систем при равенстве входных мощностей

Три фазы	Пять фаз
$U_{BX3} = 1$ $I_{BX3} = 2/3 = 0,666$ $P_{BX3} = U_{BX3} I_{BX3} = 2/3 = 0,666$ $P_{BX3} / P_{BX5} = 1$ $I_{S3} = 4/9 = 0,444$ $U_{S3} = 4/9 = 0,444$ $P_{S3} = 3 (4/9) (4/9) = 0,593$ $I_3 = (4/9) (1,06) = 0,471$ $U_3 = (4/9) (1,06) = 0,471$ $R_{\Phi3} = 1$	$U_{BX5} = \sqrt{3}/3 = 0,577$ $I_{BX5} = 2\sqrt{3}/3 = 1,155$ $P_{BX5} = U_{BX5} I_{BX5} = 2/3 = 0,666$ $P_{BX5} / P_{BX3} = (2/3) / (2/3) = 1$ $I_{S5} = (2/5) (2\sqrt{3}/3) = 0,46$ $U_{S5} = (2\sqrt{3}/3) (6/25) = 0,277$ $P_{S5} = 5 (0,46) (0,277) = 0,637$ $I_5 = (2/5) (2\sqrt{3}/3) (1,02) = 0,469$ $U_5 = (2\sqrt{3}/3) (6/25) (1,02) = 0,283$ $R_{\Phi5} = 3/5$

действующего значений тока K_{I3} и напряжения K_{U3} для трехфазной нагрузки:

$$P_{BX3} / P_{S3} = (2/3) / 3 (4/9) (4/9) = 2 (81) / (9) (16) = 9/8 = 1,125.$$

Так как формы тока и напряжения одинаковы (рис. 11), коэффициенты пересчета средневывпрямленного и действующего значений для тока и напряжения равны и определяются как

$$K_{I3} = K_{U3} = \sqrt{1,125} = 1,06.$$

Действующие значения фазного тока и напряжения трехфазной нагрузки равны $I_3 = (4/9) (1,06) = 0,47$;

$$U_3 = (4/9) (1,06) = 0,47.$$

Для пятифазной нагрузки

$$P_{BX5} / P_{S5} = 2 / 5 (4/5) (12/25) = 50 / 48 = 1,042.$$

Так как формы тока и напряжения по рис. 12 совпадают, коэффициенты пересчета средневывпрямленного и действующего значений для тока и напряжения пятифазной нагрузки могут быть определены как $\sqrt{1,042} = 1,02$.

Тогда действующие значения фазного тока и напряжения пятифазной нагрузки в первом приближении равны

$$I_5 = (4/5) (1,02) = 0,816; U_5 = (12/25) (1,02) = 0,49.$$

Определим, при каком значении входного напряжения U_{BX5} имеет место равенство входных мощностей P_{BX3} и P_{BX5} при $U_{BX3} = 1$, учитывая соотношение сопротивлений $R_{\Phi3} = 1$ и $R_{\Phi5} = 3/5$.

Исходя из того, что $P_{BX3} = 2/3$, а $P_{BX5} = (I_{BX5})^2 R_{S5}$, определим I_{BX5} , при котором мощности P_{BX3} и P_{BX5} равны, учитывая, что $R_{S5} = 1/2$:

$$I_{BX5} = \sqrt{4/3} = 2\sqrt{3}/3 = 1,155.$$

При этом

$$U_{BX5} = I_{BX5} R_{S5} = (2\sqrt{3}/3) (1/2) = \sqrt{3}/3 = 0,577.$$

$R_{S5} = 1/2$ – суммарное входное сопротивление пятифазной нагрузки по постоянному току, которое определяется при $R_{\Phi5} = 3/5$.

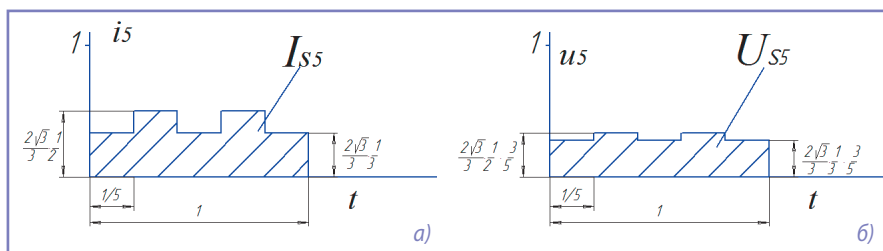


Рис. 13. Форма мгновенного значения тока и напряжения фазы пятифазной нагрузки при пониженном входном напряжении пятифазного преобразователя

То есть если $U_{BX3} = 1$, а $U_{BX5} = \sqrt{3}/3$, входные мощности P_{BX3} и P_{BX5} равны при соотношении величин сопротивлений $(3/5) R_{\Phi3} = R_{\Phi5}$.

Форма мгновенного значения тока фазы трехфазной нагрузки имеет вид, представленный на рис. 11а. Средневывпрямленное значение тока фазы трехфазной нагрузки определяется как площадь фигуры по рис. 11а выражением

$$I_{S3} = (2/3) (1/3) + (1/3) (2/3) = 2/9 + 2/9 = 4/9 = 0,44.$$

Форма мгновенного значения напряжения фазы трехфазной нагрузки имеет вид, представленный на рис. 11б. Средневывпрямленное значение напряжения фазы трехфазной нагрузки определяется как площадь фигуры по рис. 11б выражением

$$U_{S3} = (2/3) (1/2) (2/3) + (2/3) 1 (1/3) = 4/9 = 0,44.$$

Форма мгновенного значения тока фазы пятифазной нагрузки имеет вид, представленный на рис. 13а. Средневывпрямленное значение тока фазы пятифазной нагрузки определяется как площадь фигуры по рис. 13а выражением

$$I_{S5} = (I_{BX5} / 3) (3/5) + (I_{BX5} / 2) (2/5) = (2/5) I_{BX5} = (2/5) (2\sqrt{3}/3) = 0,46.$$

Форма мгновенного значения напряжения фазы пятифазной нагрузки имеет вид, представленный на рис. 13б. Средневывпрямленное значение напряжения фазы пятифазной нагрузки определяется как площадь фигуры по рис. 13б выражением

$$U_{S5} = (2\sqrt{3}/3) (1/3) (3/5) (3/5) + (2\sqrt{3}/3) (1/2) (2/5) (3/5) = (2\sqrt{3}/3) (6/25) = 0,277.$$

При определении U_{S5} учитывается, что $R_{\Phi5} = 3/5$, а $R_{\Phi3} = 1$.

Соотношения токов, напряжений и мощностей при равенстве входных мощностей сведены в таблицу 2.

Мощности P_{S3} и P_{S5} рассчитывались по средневывпрямленным, а не по действующим значениям токов и напряже-

ний. Это объясняет небольшое различие мощностей P_{BX3} и P_{S3} , а также P_{BX5} и P_{S5} .

Коэффициенты пересчета средневых значений и действующих значений тока K_{I3} и напряжения K_{U3} для трехфазной нагрузки равны

$$K_{I3} = K_{U3} = \sqrt{1,125} = 1,06.$$

Действующие значения фазного тока и напряжения трехфазной нагрузки равны

$$I_3 = (4/9) (1,06) = 0,471;$$

$$U_3 = (4/9) (1,06) = 0,471.$$

Для пятифазной нагрузки $P_{BX5} / P_{S5} = 0,666 / 0,637 = 1,046$. Так как формы тока и напряжения по рис. 13 примерно совпадают, коэффициенты пересчета средневых значений и действующих значений для тока и напряжения пятифазной нагрузки могут быть определены как $K_{I5} = K_{U5} = \sqrt{1,046} = 1,02$ в первом приближении.

Тогда действующие значения фазного тока и напряжения пятифазной нагрузки равны

$$I_5 = (2/5) (2 \sqrt{3}/3) (1,02) = 0,469;$$

$$U_5 = (2 \sqrt{3}/3) (6/25) (1,02) = 0,277.$$

Расчеты показывают, что средневые значения и действующие значения фазных токов и напряжений различаются всего лишь в сотых долях.

Сравнительные значения токов, напряжений и мощностей трех- и пятифазных систем при равенстве действующих значений фазных токов ($I_3/I_5 = 1$) имеют следующие соотношения:

$$\bullet I_{BX5} / I_{BX3} = (2 \sqrt{3}/3) / (2/3) = 1,73;$$

$$\bullet U_{BX3} / U_{BX5} = 1 / (\sqrt{3}/3) = 1,73;$$

$$\bullet R_{\phi3} / R_{\phi5} = 5/3;$$

$$\bullet P_{BX3} = P_{BX5};$$

$$\bullet P_3 = P_5;$$

$$\bullet U_3 / U_5 = (0,471) / (0,283) = 1,664,$$

что примерно равно 5/3.

При снижении значения входного напряжения пятифазной системы по сравнению с трехфазной в 1,73 раза и выполнении соотношения $R_{\phi3} / R_{\phi5} = 5/3$ входной ток возрастает в 1,73 раза. При этом входные и выходные мощности трех- и пятифазной систем равны, действующие значения фазных токов равны, а соотношение напряжений $U_3 / U_5 = 5/3$.

При увеличении частоты будут происходить некоторые изменения в пропорциях, но в первом приближении общий характер соотношений не изменится.

Действующие (эффективные) токи характеризуют тепловое преобразование электроэнергии. Поэтому для

точной оценки преобразования электрической энергии в механическую энергию на валу двигателя необходимо по мгновенному току фазы выделять первую гармонику и оценивать момент по действующему значению тока первой гармоники.

Равенство входных мощностей – критерий, который позволяет корректно сравнивать трех- и пятифазные системы. При равенстве входных мощностей имеет место равенство действующих значений фазных токов обмоток, то есть обеспечивается равное тепловое воздействие. Равенство результирующих намагничивающих сил обмоток необходимо оценивать по первой гармонике фазного тока.

На низких частотах (до 5 Гц), когда реакция якоря проявляется слабо и учитываются только активные сопротивления, действующие значения фазных токов равны. При увеличении частоты в расчетах необходимо учитывать реактивные сопротивления и реакцию якоря. При проведении экспериментальных исследований для корректного сравнения было выбрано $U_{BX3} = 46$ В, ШИМ 95%, а $U_{BX5} = 27$ В, ШИМ 95%. $U_{BX3} / U_{BX5} = 46 / 27 = 1,7$. При равном механическом моменте на валах трехфазной и пятифазной машин трехфазная машина набирала обороты до максимальной частоты 40 Гц при $U_{BX3} = 46$ В, ШИМ 95%, а пятифазная – при $U_{BX5} = 27$ В, ШИМ 95%.

Если входные напряжения $U_{BX3} = U_{BX5}$, то для пятифазной машины ШИМ должна быть равна примерно 52%. Это условие обеспечивает равенство мощностей, то есть пятифазная машина по сравнению с трехфазной является низковольтной. Увеличение ШИМ пятифазного преобразователя до 95% позволяет форсировать двигатель.

Выводы

Пространство состояний вращающихся результирующих векторов пятифазного преобразователя состоит из шести последовательностей коммутаций: три последовательности в пять ключей, одна последовательность в четыре ключа, одна последовательность в три ключа и одна последовательность в два ключа.

Из всех возможных вариантов последовательностей коммутаций в пять ключей только в трех случаях формируется вращающийся вектор.

Индуктивность фазы пятифазной обмотки меньше, чем индуктивность фазы трехфазной обмотки в $(5/3)^2$.

Если количество витков в фазе пятифазной обмотки меньше, чем у трехфазной, в 5/3 раза, машина становится низковольтной. Это обеспечивает более широкий диапазон входного напряжения электродвигателя с пятифазной обмоткой.

Литература

1. www.twirpx.com. Электровоз грузовой постоянного тока ЭС10 (Гранит) с асинхронными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации PDF.
2. <http://stator.by/generatory-bosch-serii-power-density-line/>. Генераторы Bosch серии Power Density Line.
3. Терешкин В.М., Морозов Д.Г., Гришин Д.А. Макетирование и экспериментальные исследования 5-фазного вентильного синхронного двигателя // Межвузовский научный сборник «Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение». – Уфа: Издательство Уфимского государственного авиационно-технического университета, 2013. – С. 262–266.
4. Терешкин В.М., Морозов Д.Г., Гришин Д.А. Частотно-управляемый пятифазный вентильный синхронный двигатель // Межвузовский научный сборник «Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение». – Уфа: Издательство Уфимского государственного авиационно-технического университета, 2013. – С. 192–198.
5. Mario J. Duran, F. Barrero, S. Toral. Multi-Phase Space Vector Pulse Width Modulation: Applications and Strategies. Renewable Energy and Power Quality Journal 5 (2007).
6. Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A. and Williamson S. Multiphase induction motor drives – A technology status review, IET Elect. Power Appl., vol. 1, no. 4, p. 489–516, Jul. 2007.

Терешкин Владимир Михайлович

Родился в 1953 году. В 1976 году окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Авиационное и автотракторное электрооборудование (инженер электромеханика)». Кандидат технических наук, доцент. В 1985 году защитил диссертацию по спецтеме. Опыт работы – 40 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электромеканика» УГАТУ. Имеет более 50 научных трудов.

Гришин Дмитрий Анатольевич

Родился в 1986 году. В 2009 году окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Электрооборудование летательных

аппаратов (инженер электромеханик)». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время работает инженером-схемотехником ООО «Башуралтехсервис». Имеет более 10 научных трудов.

Макулов Ирек Альбертович

Родился в 1966 году. В 1988 году окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов (инженер электромеханик)». Опыт работы – 28 лет. В настоящее время работает директором по развитию предприятия ООО «Газ-Проект-Инжиниринг», преподает в Уфимском государственном нефтяном техническом университете. Имеет более 50 научных трудов.

Tereshkin Vladimir

Was born in 1953. In 1976 he graduated from Ufa State Aviation Technical University with specialization in «Aviation and tractor electrical equipment (electromechanical engineer)». He is candidate of technical sciences, associate professor. He defended the thesis with specialized topic. He has 40 years of work experience. At present he works as associate professor of «Electro mechanics» department of Ufa State Aviation Technical University.

Grishin Dmitrii

Was born in 1986. In 2009 he graduated from Ufa State Aviation Technical University with specialization in «Airborne vehicle electric

equipment (electromechanical engineer)». He has 7 years of work experience. At present he works as layout engineer at Bashuraltehservis Limited. He has 10 scientific works.

Makulov Irek

Was born in 1966. In 1988 he graduated from Ufa State Aviation Technical University with specialization in «Airborne vehicle electric equipment (electromechanical engineer)». He has 28 years of work experience. At present he works as a Development director of LLC «Gas Project Engineering», he teaches at Ufa State Petroleum Technological University. He has more than 50 scientific works.

Математическое описание и моделирование виброизолирующего устройства с неодимовым компенсатором жесткости

// Mathematical description and modeling of the vibration-isolating device with neodymium compensator stiffness //

Гурова Е.Г., к.т.н., доцент,
Макаров С.В., Дегтяренко А.В.,
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск

Панченко Ю.В.,
НПО ПАО «ЭЛСИБ», г. Новосибирск

В статье представлено математическое описание структурной схемы виброизолирующего устройства с компенсатором жесткости. Произведено моделирование виброизолирующей системы с различными функциональными элементами, в ходе которого получены осциллограммы работы виброизолирующего устройства с неодимовым компенсатором жесткости.

Ключевые слова: моделирование, неодимовый магнит, виброизоляция, компенсатор жесткости, система перестройки.

In this article gives a mathematical description of the block diagram of the vibration-isolating device with a compensator stiffness. The vibration isolator system simulation performed with different functional elements, during which operation waveforms obtained with neodymium antivibration device compensator stiffness.

Keywords: modeling, neodymium magnet, vibration protection, stiffness compensator adjustment system.

Для определения свойств виброизолирующего устройства с неодимовым компенсатором жесткости на стадии теоретической разработки целесообразно исследовать его математическую модель. Уравнение движения массы, связанной с основой виброизолирующего устройства с компенсатором жесткости (без системы перестройки), получено из математической модели устройства. В [1] выведено уравнение виброизолирующего устройства с компенсатором жесткости (линейным и нелинейным). Высокие требования по точности и надежности функционирования механических транспортных систем, выполняющих заданные функции, является основополагающим вопросом в процессе их разработки. На стабильность работы подобных систем влияют динамические нагрузки, которым устройство и отдельные его элементы подвергаются во время эксплуатации. Источниками этих возмущений могут служить электромеханические устройства [2]: приводы, исполнительные устройства (вентиляторы, двигатели) и т.д.

В случае использования в виброизолирующих устройствах нелинейных компенсаторов исследовать свойства таких подвесок следует с помощью методов анализа нелинейных систем.

Дифференциальное уравнение, описывающее поведение массы на упругом подвесе, содержащем пружину и нелинейный компенсатор жесткости, имеет вид

$$mx'' + cx - F_1(x) + k_{\text{СП}}(x) \cdot F_k(x) = F(t), \quad (1)$$

где m – масса объекта;

x – перемещение объекта;

c – жесткость упругого элемента;

$F_k(x)$ – функция, описывающая характеристику компенсатора;

$k_{\text{СП}}(x)$ – коэффициент системы перестройки, зависящий от сдвига центра колебательных движений якоря;

$F(t)$ – возмущающая сила.

На основе уравнения равновесия (1) составим кинематическую схему устройства с компенсатором жесткости и системой управления, вид которой показан на рис. 1.

Уравнение силовой характеристики супермагнитного компенсатора можно представить в виде

$$F(x) = F_1 + F_2 = \frac{\pi \mu_0}{4} \left(\frac{2B_0}{\mu_0} \right)^2 \times \\ \times R^4 \left(\frac{1}{(x)^2} + \frac{1}{(x+2h)^2} - \frac{2}{(x+h)^2} \right) - \\ - \frac{\pi \mu_0}{4} \left(\frac{2B_0}{\mu_0} \right)^2 \times \\ \times R^4 \left(\frac{1}{(b-x)^2} + \frac{1}{(b-x+2h)^2} - \frac{2}{(b-x+h)^2} \right), \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м

B_0 – остаточная магнитная индукция магнита, Т;

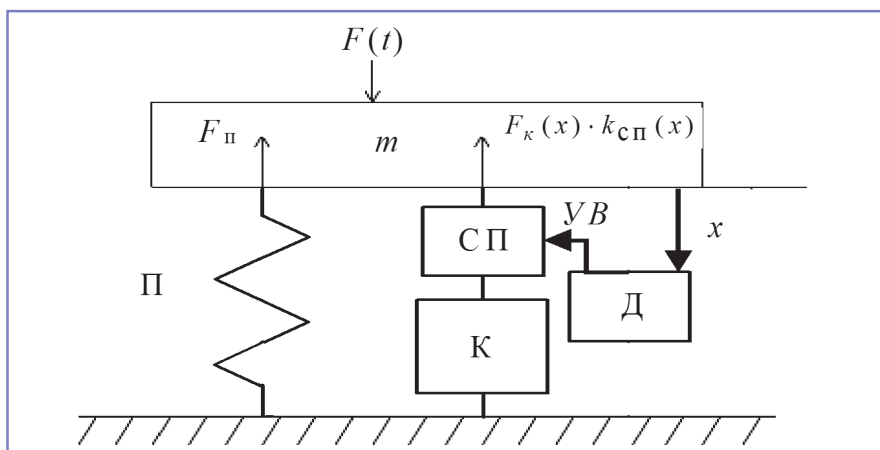


Рис. 1. Кинематическая схема виброизолирующей подвески с компенсатором жесткости и системой управления

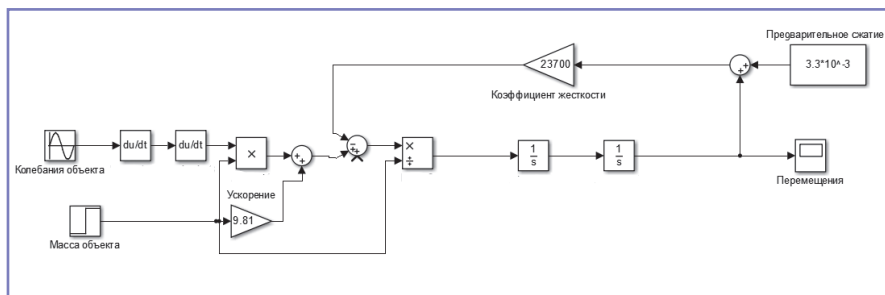


Рис. 2. Математическая модель колебательной системы с упругим элементом и без компенсатора жесткости

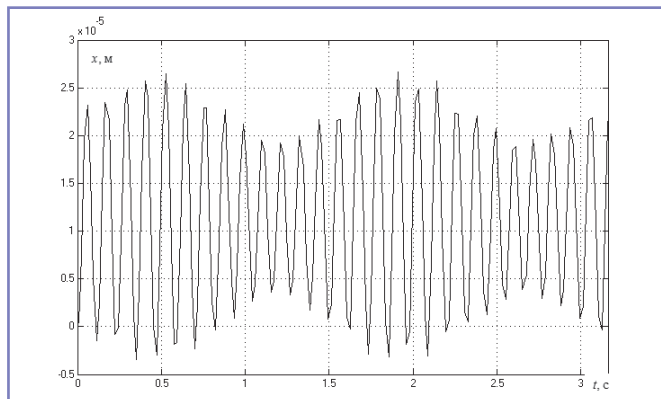


Рис. 3. Осциллограмма работы колебательной системы без компенсатора жесткости

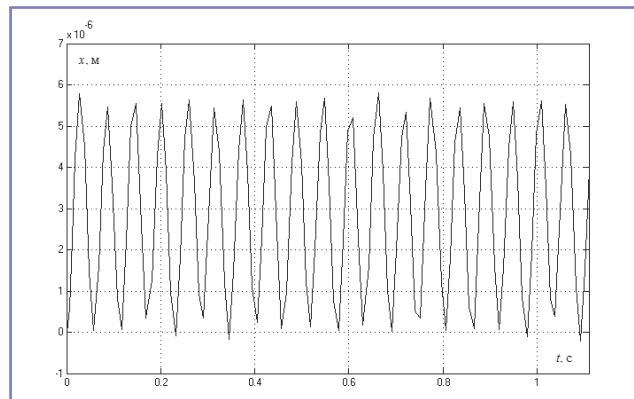


Рис. 5. Осциллограмма работы виброизолирующего устройства с неодимовым компенсатором жесткости

R – радиус магнита, м;

h – высота магнита, м;

x – смещение от центра, м;

b – зазор между магнитами в компенсаторе жесткости, представляет собой разность между расстоянием δ между магнитами и шириной якоря, которая равна ширине магнита h :

$$b = \delta - h, \quad (3)$$

где δ – максимальное расстояние между двумя магнитами, м.

Для составления и теоретического исследования моделей виброизолирующих устройств удобнее всего использовать метод, используемый в теории автоматического управления – представление систем в виде структурных схем и их моделирование [3].

При составлении расчетной схемы в программе Simulink придерживаются некоторых правил:

- каждое звено имеет одну входную величину и одну выходную величину (действующие в системах автоматического регулирования величины обычно называют переменными);

- все звенья однонаправленные, то есть входная переменная влияет на выходную, а выходная на входную – нет;

- звенья описываются не дифференциальными уравнениями, а так назы-

ваемыми передаточными функциями. Передаточная функция – это отношение изображения Лапласа выходного сигнала к изображению входного сигнала при нулевых начальных условиях.

На рис. 2 и 3 представлены математическая модель колебательной системы без компенсатора жесткости и осциллограмма результирующих перемещений защищаемого объекта.

Моделирование показало, что система имеет неустойчивые колебания. В системе присутствуют установившиеся колебания различных частот и амплитуд, причем максимальная амплитуда колебаний достигает 3 см. Данные колебания являются неудовлетворительным показателем системы виброизоляции.

и массу m объекта. Однако в данной модели не учитывается наличие системы управления, отслеживающей изменение статической составляющей усилия $F(t)$, то есть модель позволяет исследовать поведение системы только в стационарных режимах.

Исходные данные расчетной модели виброизолирующего устройства:

- масса груза $m = 8$ кг;
- жесткость пружины $c = 2370$ Н/м.

Для представленной модели входным сигналом служит синусоидальный (Sine Wave) со следующими параметрами:

- амплитуда – 1,5 мм;
- частота $2\pi \cdot 8$ рад/с;
- остальные параметры – 0.

В качестве нагрузки используется ступенчатый сигнал (Step). В виброизо-

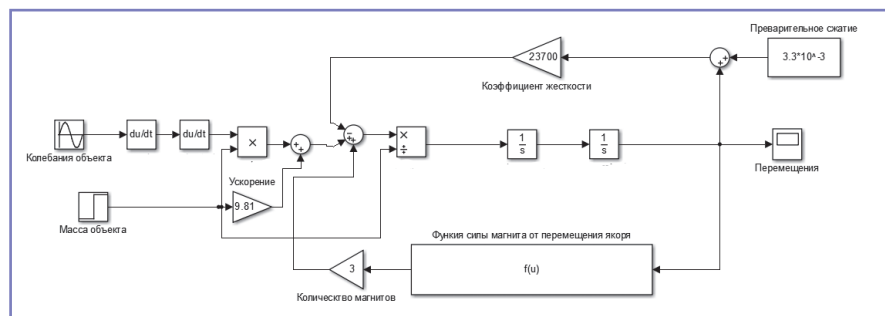


Рис. 4. Математическая модель виброизолирующего устройства с компенсатором жесткости

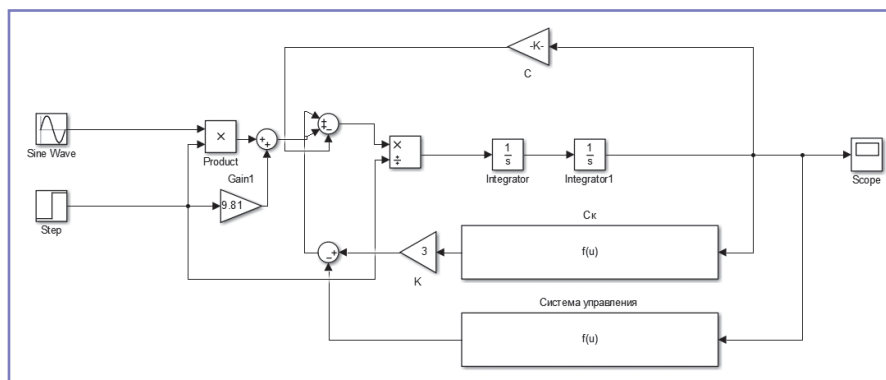


Рис. 6. Математическая модель виброизолирующего устройства с компенсатором жесткости и системой перестройки

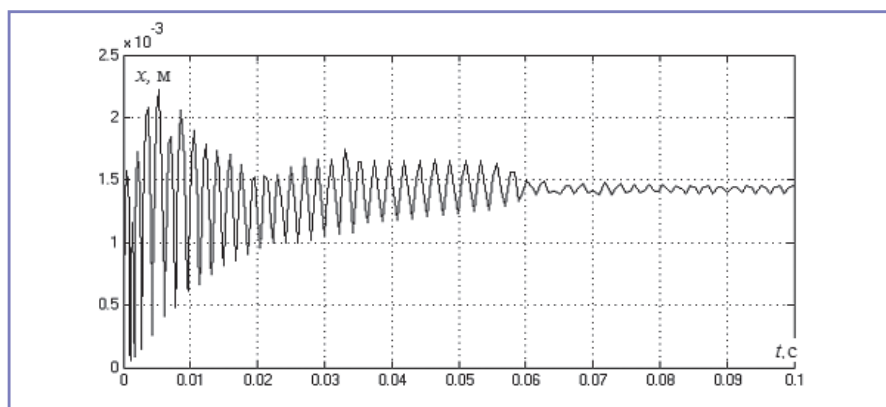


Рис. 7. Осциллограмма работы виброизолирующего устройства с неодимовым компенсатором жесткости и системой управления

лирующую систему без корректирующей звена нагрузки не подаем.

Результаты моделирования представлены на рис. 5.

По результатам моделирования видно, что в системе присутствуют консервативные колебания с достаточно малой амплитудой (порядка тысячной доли миллиметра). Однако колебания совершаются в положительной области смещения, что говорит о том, что сила компенсатора действует с большей величиной, чем сила упругости, что вызвало смещение оси колебаний.

Для получения устойчивых колебаний виброизолирующей системы и возможности коррекции свойств введем в модель систему управления (рис. 6). В данном случае осциллограмма результирующих перемещений примет вид, показанный на рис. 7.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что виброизолирующая система с неодимовым компенсатором жесткости устойчива с введением системы управления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-80134 мол_эв_а.

Литература

1. Гурова Е.Г. Виброизолирующие подвески транспортных энергетических установок с нелинейными электромагнитными компенсаторами жесткости. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2012. – 156 с.
2. Возникий И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. В 2 ч. Ч. 1. – М.: Моркнига, 2008. – 282 с.
3. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления: учеб. пособие / Л.Д. Певзнер; под ред. Е.Н. Рожковой. – М.: Высшая школа, 2006. – 590 с.

Гурова Елена Геннадьевна

Родилась в 1984 году. В 2006 году окончила Сибирский государственный университет водного транспорта по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Кандидат технических наук, доцент. Защитила диссертацию по теме «Виброизолирующая подвеска судовой энергетической установки с нелинейным электромагнитным компенсатором жесткости». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехнические комплексы» НГТУ. Имеет 53 научные работы, 3 патента.

Макаров Станислав Владимирович

Родился в 1988 году. Окончил Новосибирский государственный технический университет. Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры электротехнических комплексов (ЭТК) Новосибирского государственного технического университета.

Дегтяренко Анжела Витальевна

Родилась в 1996 году. Студентка 3 курса Новосибирского государственного технического университета. Опыт работы – 6 месяцев. Работает лаборантом в Центре научно-технических работ студентов.

Панченко Юрий Вадимович

Родился в 1994 году. В 2016 году окончил ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» по специальности «Электроэнергетика и электротехника». В настоящее время работает инженером-конструктором в НПО ПАО «ЭЛСИБ». Имеет 3 научные статьи.

Gurova Elena

Was born in 1984. In 2006 she graduated from Siberia State University of Water Transport with specialization in «Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes». She is candidate of technical sciences, associate professor. She defended the thesis with topic «Vibration insulating suspension of ship power plant with nonlinear electromagnetic stiffness compensator». She has 10 years of work experience. At present she works as associate professor of «Electric engineering complexes» department of Novosibirsk State Technical University. She has 53 scientific works, 3 patents.

Makarov Stanislav

He was born in 1988. He graduated from Novosibirsk State Technical University. He has 4 years of work experience. At present, he works as teaching assistant of Electrical systems department of Novosibirsk State Technical University.

Degtyarenko Anzhela

Was born in 1996. She is three-year student at Novosibirsk State Technical University. She has 6 months of work experience. She works as laboratory assistant at Scientific and technological works of students.

Panchenko Yuri

He was born in 1994. In 2016 he graduated from Novosibirsk State Technical University majoring in «Electric industry and electric engineering». At present, he works as engineering designer at ELSIB Company. He has 3 scientific articles.

Совершенствование системы управления тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза

// Improving the system of traction control electric drive hybrid shunting locomotives //

**Федяева Г.А., д.т.н., доцент,
Брянский государственный технический университет, г. Брянск**

**Иньков Ю.М., д.т.н., профессор,
МГУПС (МИИТ), г. Москва**

**Тарасов А.Н.,
ЗАО «Пензенский завод точных приборов», г. Пенза**

**Конохов Д.В.,
АО «Транснефть – Дружба», г. Брянск**

В статье представлена функциональная схема системы разрывного управления тяговыми асинхронными двигателями гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н, модифицированная с учетом регулирования скольжения колес для реализации предельных тяговых и тормозных усилий. Приведены принципы построения комплексной электромеханической модели электропривода четырехосного тепловоза и результаты моделирования разгона локомотива при различных условиях сцепления. Предложенная система управления плавно выводит тяговый электропривод на предел по сцеплению в процессе разгона и, обладая высокими быстродействием и точностью, обеспечивает реализацию предельных усилий при совместном регулировании асинхронных двигателей тележки.
Ключевые слова: тяговый электропривод, асинхронные двигатели, разрывное управление, гибридный тепловоз, предельные усилия.

A functional diagram of the system of burst control asynchronous traction motors of hybrid shunting-export locomotive TEM9N modified subject to regulation slip wheel of the maximum tractive and braking efforts. Explained the principles of integrated electromechanical model of four-axle electric locomotive and the simulation results of the acceleration of the locomotive under various conditions of coupling. Proposed the control system seamlessly displays of electric traction to the limit grip during acceleration and with high speed and accuracy, ensures the implementation of the limit forces at the joint regulation of asynchronous motors truck.
Keywords: electric traction, induction motors, discontinuous control, hybrid locomotive, utmost efforts.

В отечественном и зарубежном тяговых электроприводах (ТЭП) локомотивов широко внедряются двигатели переменного тока взамен традиционных коллекторных двигателей последовательного возбуждения. Наибольшее распространение на современном подвижном составе получили асинхронные тяговые двигатели (АТД) с короткозамкнутым ротором в силу простоты их конструкции. В частности, АТД применены на отечественных серийно выпускаемых тепловозах 2ТЭ25А, электровозах ЭП20, 2ЭС10, опытном электровозе 2ЭВ120.

Динамические и тяговые качества локомотивов с АТД определяющим образом зависят от системы управления электроприводом. В то же время из вышеперечисленных локомотивов только на тепловозе 2ТЭ25А применены отечественные алгоритмы управления тяговыми двигателями, разработанные Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом подвижного состава (ВНИКТИ), а на российские электровозы интегрированы алгоритмы зарубежных фирм Siemens, Alstom, Bombardier

Transportation, являющиеся интеллектуальной собственностью этих фирм.

В современных условиях целесообразно, наряду с внедрением импортных систем управления, создавать и совершенствовать с учетом мировых достижений собственные алгоритмы управления ТЭП, используя для их отработки как уже имеющиеся образцы локомотивов, так и новые компьютерные технологии.

С нашей точки зрения, для этих целей хорошо подходит четырехосный гибридный маневрово-вывозной тепловоз ТЭМ9Н с АТД, разработанный Людиновским тепловозостроительным заводом в рамках пилотного проекта. На этом тепловозе применен комплекс технических решений в системе электропитания, снимающих ряд ограничений по управлению ТЭП в пусковых режимах по сравнению с обычным электроприводом тепловоза. Использование в системе электропитания аккумуляторной батареи с огромным энергозапасом (300 кВт*часов) и суперконденсаторов дает возможность отойти от традиционного для тепловозов ступенчатого (позиционного) изменения мощности дизеля на тягу и обрабатывать алгоритмы регулирования силы тяги и скорости, применимые также для электровозов нового поколения.

Наряду с этим в системе управления (СУ) ТЭП ТЭМ9Н внедрены наиболее динамичные алгоритмы разрывного управления АТД при регулировании токосцепления статора [1, 2], позволяющие реализовать и испытать различные варианты управления приводом на пределе по сцеплению колес с рельсами. Известно, что коэффициент сцепления между колесом и рельсом зависит от проскальзывания (скольжения) колеса относительно скорости локомотива. Эта нелинейная зависимость, называемая характеристикой сцепления и определяемая погодными условиями, состоянием рельсов и многими другими фак-

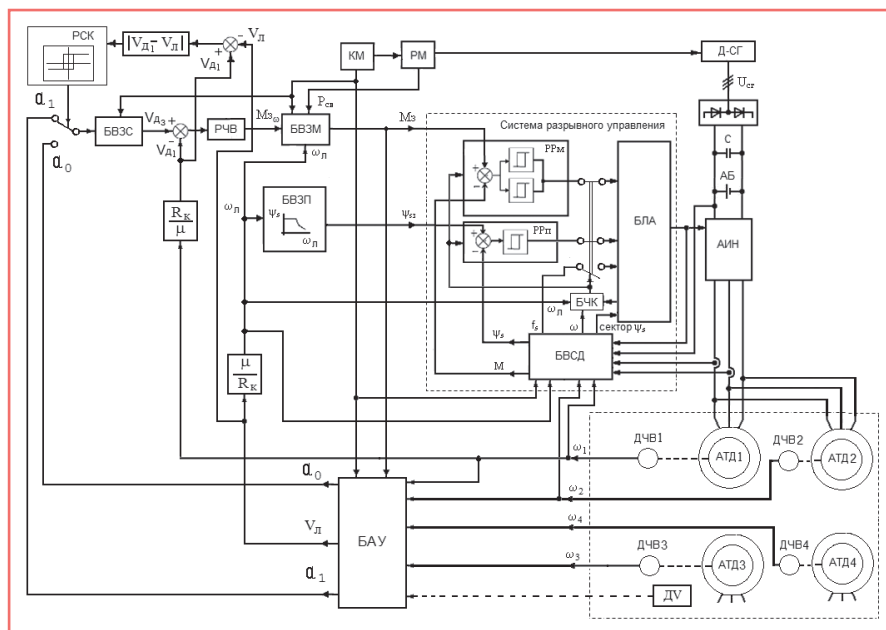


Рис. 1. Функциональная схема СУ ТЭП тепловоза ТЭМ9Н, модифицированная с учетом регулирования скольжения колес

торами, имеет случайный разброс, но в большинстве случаев является кривой с максимумом, на котором желательно, но весьма трудно удержаться для реализации предельных тяговых и тормозных усилий. Существуют различные способы приближения к максимуму, «нащупывания» максимума характеристики сцепления [3, 4, 5, 6].

Наиболее очевидным и наглядным вариантом (хотя и не самым точным) является регулирование проскальзывания. Функциональная схема СУ ТЭП ТЭМ9Н, модифицированная с учетом регулирования скольжения колес, представлена на рис. 1. На тепловозе ТЭМ9Н применено потележечное регулирование – параллельное подключение двух двигателей тележки (АТД1, АТД2) к одному автономному инвертору напряжения (АИН). На рис. 1 показана схема СУ ТЭП первой тележки. Для двигателей второй тележки (АТД3, АТД4) схема аналогична.

При пуске локомотива контроллером машиниста (КМ) для СУ ТЭП сначала задается максимальная сила тяги, поступающая в блок вычисления задания момента с учетом ограничений (БВЗМ) и фактически определяющая ограничение по моменту АТД во внутреннем контуре регулирования момента. Но задание на момент и сам момент равны нулю, пока нет задания на скорость. Далее при помощи КМ задается требуемая скорость локомотива, поступающая в блок вычисления задания скорости (БВЗС) и определяющая ограничение

задания частоты вращения АТД во внешнем контуре регулирования скорости. После этого появляется задание на момент на выходе регулятора частоты вращения АТД, и локомотив начинает разгон, постепенно увеличивая силу тяги (до заданной максимальной величины, если позволяет сцепление), и пытается достичь установленной КМ скорости.

С учетом зарубежного и отечественного опыта [3, 5, 6] задание на частоту вращения двигателя (рис. 1), приведенную к линейной скорости колеса ($V_{дз}$), определяется в БВЗС путем интегрирования задания на линейное ускорение колеса (a_1 или a_0), вычисляемое в блоке адаптации ускорения (БАУ) и жестко привязанное к линейному ускорению локомотива, чтобы можно было увеличить или уменьшить скорость скольжения колес относительно локомотива:

$$\bullet \text{ в режиме тяги } a_1 = a_n + \Delta a_1, \\ a_0 = a_n - \Delta a_2;$$

• в режиме электрического торможения $a_1 = a_n - \Delta a_1$, $a_0 = a_n + \Delta a_2$, где a_n – линейное ускорение локомотива; a_1 и a_0 – задания на линейное ускорение колес; Δa_1 и Δa_2 – небольшие положительные величины, адаптируемые к массе состава и условиям движения.

Ускорение локомотива a_n изменяющееся в процессе движения, постоянно вычисляется в БАУ по изменению оценочной скорости локомотива V_n (определяемой по измеренным частотам вращения роторов АТД $\omega_1 - \omega_4$) за заданные промежутки времени Δt ($a_n = \Delta V_n / \Delta t$).

Если на локомотиве установлен датчик линейной скорости ДВ (его сигнал показан пунктиром на рис. 1), то для вычисления ускорения локомотива лучше использовать этот сигнал.

Переключение между значениями a_1 и a_0 осуществляется под контролем релейного регулятора скольжения колес (РСК) с адаптивным гистерезисным допуском. Для снижения фрикционных автоколебаний на вход РСК в режиме тяги подается абсолютная величина разности между частотой вращения двигателя первой (по ходу движения) оси тележки (имеющей меньшую вертикальную нагрузку), приведенной к линейной скорости колеса ($V_{д1}$), и скоростью локомотива (V_n). То есть в данном случае для первой тележки (рис. 1) используется абсолютная величина скольжения колес первой оси. Пока эта величина не превысит допустимый верхний порог РСК, БВЗС в режиме тяги интегрирует величину a_1 , после превышения порога – величину a_0 (в режиме торможения – наоборот). Обратное переключение с a_0 на a_1 происходит, когда скольжение колес становится меньше нижнего порога, заданного в РСК.

Задание на скорость $V_{д1}$ вычисленное БВЗС путем интегрирования a_1 или a_0 , сравнивается с измеряемой приведенной частотой $V_{д1}$ и полученное рассогласование подается на регулятор частоты вращения (РЧВ), вычисляющий задание на момент ($M_{зв}$), которое затем ограничивается в БВЗМ на требуемом уровне (M_3). Полученное задание на момент M_3 , а также задание на потокосцепление статора Ψ_s , определяемое в блоке вычисления задания потокосцепления (БВЗП) в зависимости от скорости локомотива, подаются в систему разрывного управления (РУ) [1, 2]. Система РУ содержит релейные регуляторы момента (РРМ) и потокосцепления (РРП), блок вычисления состояния двигателя (БВСД), блок логического автомата (БЛА) и блок частоты коммутаций (БЧК). При полном поле БЛА осуществляет выбор сигналов на переключение транзисторов АИН в зависимости от состояния релейных регуляторов и сектора координатной плоскости, в котором находится вектор потокосцепления статора. В режиме ослабления поля БЛА вырабатывает сигналы переключения транзисторов в зависимости от положения вектора потокосцепления и требуемой частоты напряжения статора f_s . БЧК контролирует частоту

коммутаций транзисторов АИН и подает сигналы на изменение ширины гистерезисных допусков релейных регуляторов или переход к однократной коммутации транзисторов на периоде (полноблочному режиму) при ослаблении поля.

Таким образом, во всех режимах регулирования, кроме полноблочного, момент АД находится внутри релейного гистерезисного коридора. Решение об уменьшении момента принимается по достижении верхней границы, об увеличении – по достижении нижней. Ширина коридора определяет частоту переключений транзисторов, момент очередной коммутации заранее неизвестен. Для минимизации потерь в двигателе и поддержания комфортной температуры кристаллов частота (некая средняя) переключения вентилей АИН изменяется в зависимости от скорости локомотива. Характер изменения частоты можно представить в виде ломаной линии (рис. 2), где условно показаны пять режимов управления, причем в начале разгона, на низкой скорости, частота коммутаций фиксированная.

Контроль состояния АД и определение текущих вычисляемых переменных машины по модели осуществляются в блоке, условно названном БВСД. Для этого на вход данного блока подаются текущее напряжение промежуточного контура (dc-link) и матрица состояния ключей АИН для определения мгновенного значения фазных напряжений, токи двух фаз АИН, потребляемые двумя двигателями тележки (АТД1, АТД2 для первой тележки), скорости роторов АД тележки (ω_1 и ω_2), по которым определяется средняя скорость ротора (ω) для модели АД. Модель АД, общая для двух двигателей тележки (усредненная) [7], построена в неподвижных осях α - β по уравнениям [8]

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\alpha} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\alpha} + U_\alpha, \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\beta} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\beta} + U_\beta, \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\alpha} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\alpha} - p_n \omega \psi_{r\beta}, \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\beta} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\beta} + p_n \omega \psi_{r\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_\mu}{\sigma L_s L_r} (\psi_{s\beta} \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \psi_{r\beta}), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_α , U_β – напряжения статора;

$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_s L_r}$ – коэффициент рассеяния двигателя; L_μ – приведенная взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; L_s – собственная индуктивность обмотки статора; L_r – приведенная собственная индуктивность обмотки ротора; R_s , R_r – активное сопротивление обмотки статора и приведенное сопротивление ротора соответственно; $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$ – потокосцепления обмоток статора усредненной модели; $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – потокосцепления обмоток ротора усредненной модели; ω – средняя скорость роторов двигателей тележки; p_n – число пар полюсов двигателя; M – электромагнитный момент усредненной модели двигателя.

Токи усредненной двухфазной модели двигателя (1) тележки по осям α и β определяются через потокосцепления из системы алгебраических уравнений. По ним вычисляются модуль и положение вектора модельного тока статора. Момент двигателя, определяемый при решении системы дифференциальных уравнений (1), пропорционален мнимой части произведения векторов потокосцепления статора и ротора или произведению их модулей и значению синуса угла между ними. Модуль потокосцепления ротора меняется медленно, так как

постоянная времени ротора достаточно велика. Модуль потокосцепления статора, если рассматривать небольшой отрезок времени, можно принять постоянным. Поэтому управление электромагнитным моментом двигателя осуществляется в основном путем изменения угла между потокосцепления-

ми. Это достигается посредством выбора вектора напряжения, вызывающего такое изменение положения потокосцепления статора относительно потокосцепления ротора, которое обеспечивает необходимый знак приращения электромагнитного момента и одновременно необходимый знак приращения модуля потокосцепления. В каждом из шести секторов, на которые разбивается координатная плоскость, существует определенный набор векторов напряжения для всех возможных комбинаций требуемых знаков изменения модуля потокосцепления и момента [1, 2]. В результате, несмотря на то что векторные преобразования в системе отсутствуют и используются только релейные регуляторы, вращение вектора потокосцепления статора обеспечивается с требуемой частотой при поддержании модуля вектора потокосцепления на заданном уровне.

Контроль состояния машины производится с использованием фактических значений тока, скорости роторов и фазных напряжений. Датчики тока (два на пару параллельных моторов) используются для того, чтобы видеть отличие основной наблюдаемой координаты – вектора среднего тока двигателей тележки от модельного тока. Если модельный ток не там, где ожидалось, значит, и потокосцепление не там, и момент не тот, и нужно теперь понять, где потокосцепление на самом деле и каков момент, внести коррективы. То есть модель непрерывно подстраивается под реалии.

С целью анализа работы электропривода целесообразно использовать математическое и компьютерное моделирование. Для исследования динамических электромеханических процессов в ТЭП тепловоза ТЭМ9Н была составлена модель ТЭП в основной библиотеке MATLAB Simulink. Оценка достоверности результатов моделирования производилась путем сравнения расчетных осциллограмм с экспериментальными данными, полученными при испытаниях тепловоза ТЭМ9Н (рис. 3).

В модель были подставлены параметры асинхронного двигателя АД917УХЛ1, установленного на ТЭМ9Н, моделирование производилось при тех же значениях напряжения в промежуточном контуре, скорости локомотива и задания на момент, что и в эксперименте (рис. 3). Ширина релейного коридора для электромагнитного момента АД была подобрана такой же, как на

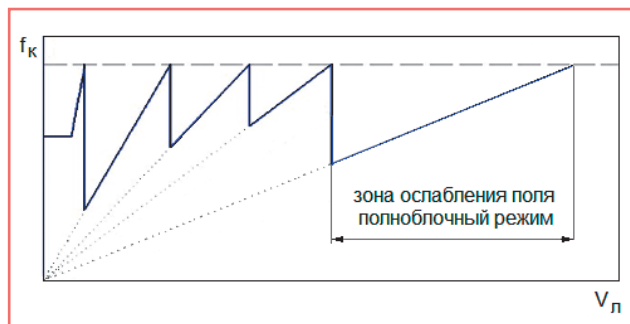


Рис. 2. График, поясняющий принцип изменения частоты переключений транзисторов АИН при изменении скорости локомотива: f_k – частота коммутаций; V_n – скорость локомотива

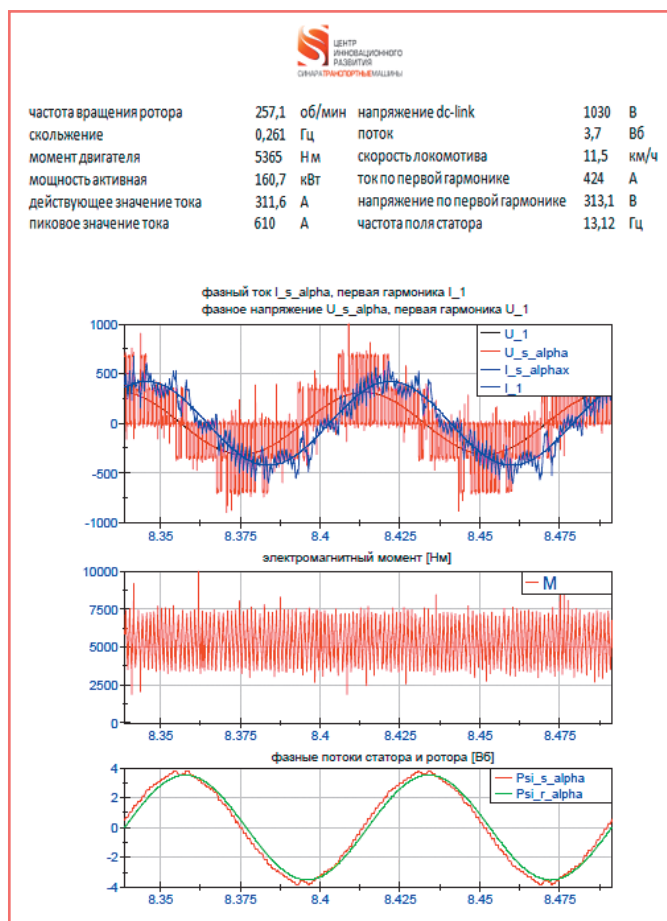


Рис. 3. Осциллограммы натурных испытаний ТЭП ТЭМ9Н

экспериментальных осциллограммах, чтобы обеспечить примерно одинаковую частоту коммутаций в эксперименте и расчете. Для сокращения времени расчета динамики ТЭП при дальнейшем соединении электрической подсистемы MATLAB Simulink с детализированной моделью механической части тепловоза, выполненной в программном комплексе (ПК) «Универсальный механизм» (УМ) [9], моделирование работы статического преобразователя было выполнено с использованием коммутационных функций. Результаты моделирования (рис. 4) показывают удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных (расхождение не превышает 7%, если отбросить мгновенные пиковые значения тока и момента), что подтверждает достоверность расчетов и возможность использования модели для анализа динамических процессов ТЭП ТЭМ9Н при реализации предельных усилий.

По экономическим соображениям и условиям размещения на тепловозе ТЭМ9Н применено потележечное регулирование АТД, что вносит ряд особенностей в регулирование АТД на пределе по сцеплению. Скорости роторов парал-

вертикальных нагрузок колес первой и второй осей тележек, разность диаметров бандажей колесных пар, различие условий сцепления колес первой и второй осей каждой тележки, колебания в механической передаче, вызываемые многочисленными внешними факторами, и др.

Достаточно полно учесть процессы в механической части ТЭП при регулировании на пределе по сцеплению позволяет модель локомотива с высокой степенью детализации. Динамическая

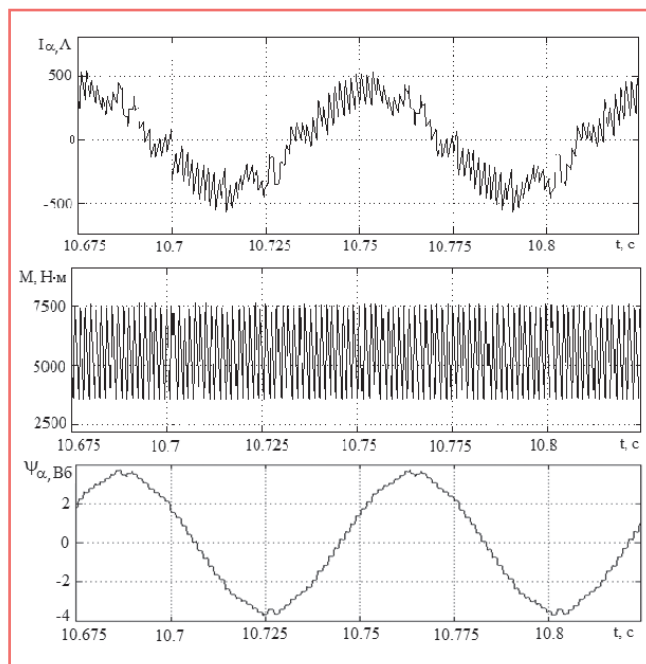


Рис. 4. Результаты моделирования ТЭП ТЭМ9Н:
 I_α – ток статора по оси α ; M – электромагнитный момент;
 Ψ_α – потокосцепление статора по оси α

тельно включенных двигателей каждой тележки могут отличаться по многим причинам: различие

модель механической части тепловоза ТЭМ9Н, разработанная в ПК УМ, имеет 66 степеней свободы. Кузов моделируется твердым телом с 6 степенями свободы, и по 30 степеней свободы имеют тела, образующие каждую из тележек (рис. 5). Учет трибологических параметров в контакте «Колесо – рельс» выполнен по методике О. Полаха [9].

Модель механической части ТЭМ9Н совмещена с моделью электрической подсистемы в MATLAB Simulink с помощью интерфейса CoSimulation [10]. При таком совмещении модель механической части включается в модель электрической в виде стандартного блока – S-функции. С использованием полученной комплексной электро-механической модели рассчитаны

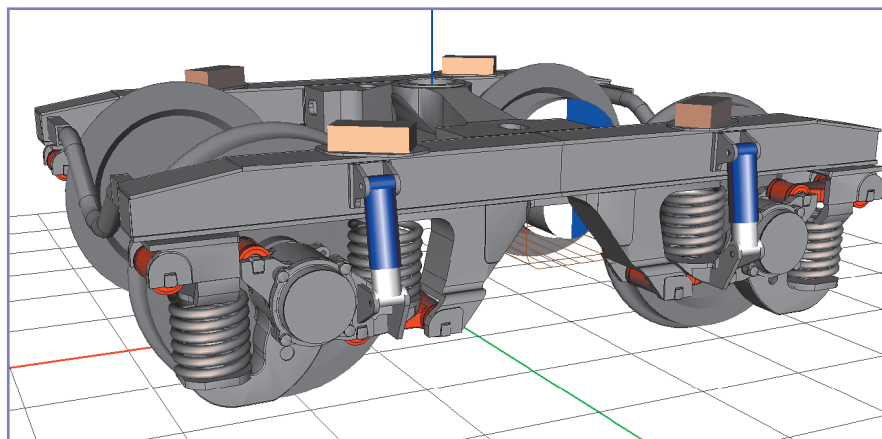


Рис. 5. Общий вид модели тележки ТЭМ9Н в ПК УМ

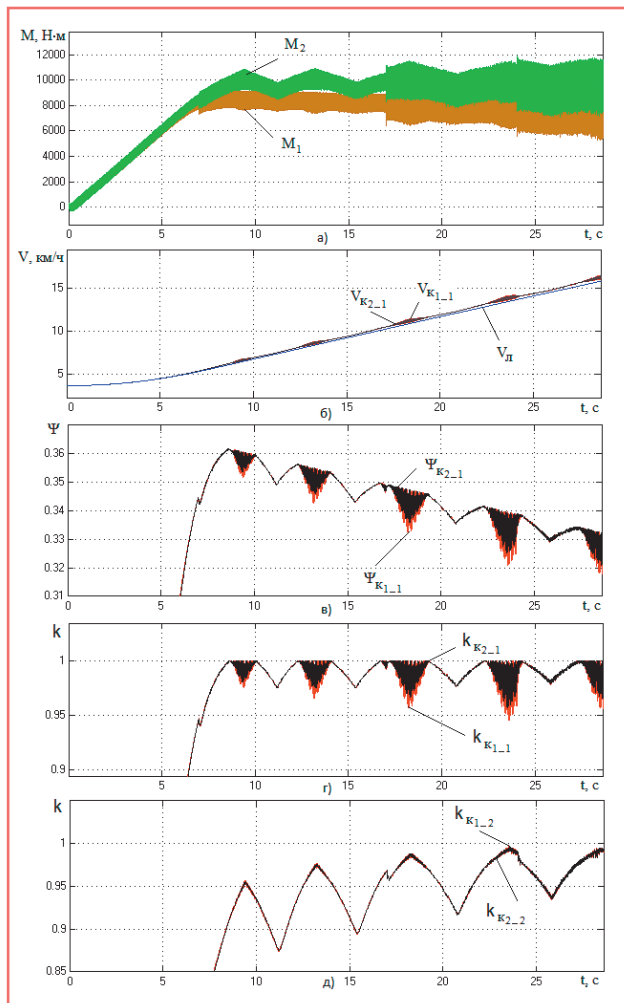


Рис. 6. Результаты моделирования разгона тепловоза с составом 1000 т на прямолинейном горизонтальном участке при реализации предельных тяговых усилий:

а) электромагнитные моменты АД первой (M_1) и второй (M_2) осей;
 б) скорости колес первой оси (V_{K1-1} и V_{K2-1}) и локомотива ($V_{л}$);
 в) коэффициенты сцепления колес первой оси (ψ_{K1-1} и ψ_{K2-1});
 г) коэффициенты сцепления колес первой оси в относительных единицах (k_{K1-1} и k_{K2-1});
 д) коэффициенты сцепления колес второй оси в относительных единицах (k_{K1-2} и k_{K2-2})

различные режимы движения тепловоза ТЭМ9Н на пределе по сцеплению. В качестве примера на рис. 6 представлены результаты моделирования разгона тепловоза с составом 1000 т при реализации предельных тяговых усилий на прямолинейном горизонтальном участке в хороших погодных условиях (результаты приведены для первой тележки локомотива).

В данном случае контроллером машиниста установлена максимальная сила тяги, которой соответствует электромагнитный момент 13000 Н·м, а предел по сцеплению находится ниже. Поэтому СУ ТЭП при разгоне выводит на предел по сцеплению колеса первой

оси, регулируя скольжение по частоте вращения АД1 (рис. 1), который реализует при этом предельный электромагнитный момент M_1 (рис. 6а), а двигатель второй оси, подключенный к тому же инвертору, развивает при этом больший электромагнитный момент (M_2) и меньшее скольжение (вращается мед-

леннее), так как вторая ось имеет большую, чем первая, вертикальную нагрузку [7, 11]. В связи с требуемым изменением частоты коммутаций (рис. 2) на графиках (рис. 6а) видно ступенчатое изменение коридора момента.

Колеса первой оси в процессе разгона достигают предела по сцеплению (ψ_0). Это видно из того, что достигает единицы относительный коэффициент сцепления (рис. 6г)

$$k = \psi / \psi_0,$$

где k – коэффициент сцепления в относительных единицах; ψ_0 – потенциальный коэффициент сцепления; ψ – коэффициент сцепления в абсолютных еди-

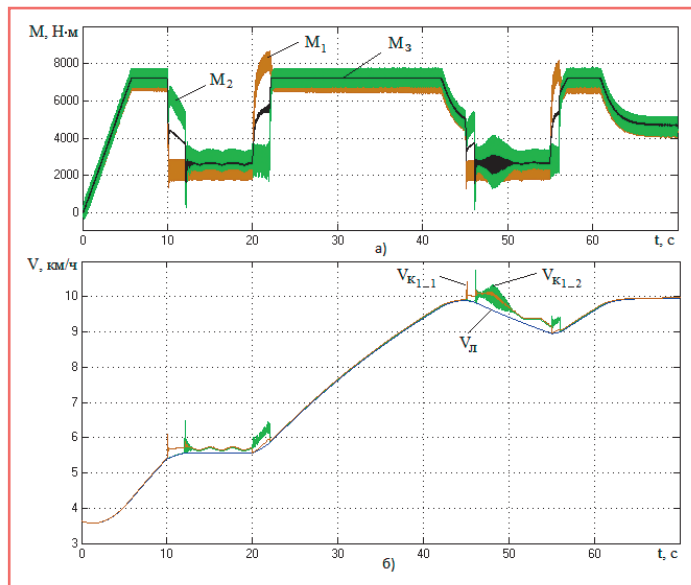


Рис. 7. Результаты моделирования разгона тепловоза с составом 1000 т на подъеме с увеличивающимся уклоном при задании на максимальный момент 7200 Н·м, задании на скорость 10 км/ч и двукратном наезде локомотива в процессе разгона на масляное пятно:

а) задание на электромагнитный момент (M_2) и расчетные электромагнитные моменты АД первой (M_1) и второй (M_2) осей;
 б) скорости первого (ближайшего к редуктору) колеса первой оси (V_{K1-1}), первого колеса второй оси (V_{K1-2}) и локомотива ($V_{л}$)

ницах (обычно именуемый коэффициентом сцепления).

Реализуемый коэффициент сцепления ψ при таком движении снижается (рис. 6в) с ростом скорости из-за того, что зависит от скорости и с увеличением скорости снижается ψ_0 . При увеличении проскальзывания развиваются фрикционные колебания колес первой оси с узлом на оси колесной пары (рис. 6б), из-за которых возникают колебания абсолютного (рис. 6в) и относительного (рис. 6г) коэффициентов сцепления колес первой оси. Колеса второй оси при этом не достигают предела по сцеплению (рис. 6д), так как в режиме тяги вторая ось имеет большую вертикальную нагрузку. За отведенное время моделирования (рис. 6) локомотив не успевает разогнаться до заданной КМ скорости, поэтому продолжает разгоняться на пределе по сцеплению в режиме полного поля.

На рис. 7 также для первой тележки представлены результаты моделирования режима разгона тепловоза ТЭМ9Н с составом 1000 т на прямолинейном подъеме с увеличивающимся уклоном. Условия сцепления те же, что и в предыдущем примере, но на данном подъеме смоделировано два масляных пятна, в пределах которых потенциальный коэффициент сцепления снижается до

$\psi_0 = 0,15$. В данном режиме контроллером установлены требуемая скорость локомотива – 10 км/ч – и максимальная сила тяги, которой соответствует ограничение по моменту АТД на уровне 7200 Н·м.

В процессе разгона тепловоза (рис. 7) задание на электромагнитный момент (M_3) увеличивается, а затем ограничивается на уровне 7200 Н·м (рис. 7а), который меньше предельного по сцеплению. Тепловоз продолжает разгоняться (рис. 7б) с запасом по сцеплению до наезда на первое масляное пятно (оси тележки наезжают на масляное пятно поочередно). При этом происходит увеличение скорости $V_{д1}$ (рис. 1), увеличивается ее рассогласование с заданием скорости, и РЧВ снижает задание на момент (рис. 7а), ТЭП регулируется на пределе по сцеплению, но скорость тепловоза не увеличивается, так как сила тяги в данном случае равна силе сопротивления движению (так подобран уклон).

После окончания первого масляного пятна оси тележки поочередно съезжают с него, момент M_3 и моменты АТД увеличиваются, и тепловоз продолжает разгоняться с запасом по сцеплению до наезда на второе масляное пятно. Здесь РЧВ опять снижает задание на момент, и ТЭП реализует предельные тяговые усилия, но скорость локомотива при этом снижается, так как уклон увеличился и сила сопротивления стала больше силы тяги. На этом участке возникают колебания электромагнитного момента АТД2 (рис. 7а) и скорости колес второй оси, так как при увеличении скольжения возникают фрикционные автоколебания, а регулирование скорости ведется по частоте вращения первого двигателя тележки (рис. 1). Но при правильных настройках СУ возникшие колебания не приводят к существенному увеличению динамических нагрузок и быстро затухают. После окончания второго масляного пятна тепловоз продолжает разгон с ограничением M_3 на уровне 7200 Н·м до достижения заданной КМ скорости 10 км/ч, после чего электромагнитный момент снижается и становится равным моменту сопротивления движению (обусловленному силой сопротивления движению).

Таким образом, предложенная система управления плавно выводит ТЭП на предел по сцеплению в процессе разгона и, обладая высокими быстро-

действием и точностью, даже в случае резкого изменения условий сцепления, обеспечивает реализацию предельных усилий при совместном регулировании асинхронных двигателей тележки.

Вместе с тем необходимо указать, что в реальных условиях имеется существенный случайный разброс величины и характера изменения потенциально-го коэффициента сцепления, имеются сложности с измерением скольжения колес и определением требуемого диапазона скольжения. Поэтому предложенная система управления может быть дополнена по результатам натурных испытаний как алгоритмически, так и аппаратно [3, 5, 6].

Несмотря на то что разработанная комплексная электромеханическая модель позволяет на стадии проектирования анализировать динамические процессы в многодвигательном электроприводе и отрабатывать различные варианты алгоритмов реализации реального коэффициента сцепления, на-сущно необходимо для их внедрения и практической проверки дальнейшее финансирование экспериментальных исследований СУ ТЭП гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н, имеющего отечественные высокодинамичные алгоритмы управления тяговыми асинхронными двигателями.

Литература

1. Depenbrok M. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine, IEEE Trans. Power Electron. – 1988. – 3. – Р. 420–429.
2. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока / Под ред. Народицкого А.Г. – СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2005. – 100 с.
3. Buscher M. Регулирование проскальзывания колес на электровозах с асинхронным тяговым приводом // Железные дороги мира. – 1994. – № 4. – С. 30–45.
4. Fleischer Modal State Control in the Frequency Domain for Active Damping of Mechanical Vibrations in Traction Drive-Trains, AMC 2004 – Kawasaki, Japan // 0–7803–8300–1/04/\$20.00 © 2004 IEEE.
5. Иньков Ю.М., Федяева Г.А., Феоктистов В.П. Система экстремального регулирования тягового электропривода с асинхронными двигателями // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – № 4. – С. 10–18.
6. Федяева Г.А., Кобищанов В.В., Матюшков С.Ю., Тарасов А.Н. Моделирование систе-

мы управления тягой и торможением магистрального грузового тепловоза в программных комплексах Matlab и «Универсальный механизм» / Вестник Брянского техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 147–151.

7. Иньков Ю.М., Федяева Г.А., Тарасов А.Н. Управление тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза с асинхронными двигателями в режиме реализации предельных усилий // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 31–38.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
9. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit. Wear 258 (2005) 992–1000.
10. Программный комплекс «Универсальный механизм», www.universalmecanism.com.
11. Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Ковалев Р.В., Смородова Т.В. Управление тягой и торможением гибридного маневрового тепловоза с асинхронными тяговыми двигателями // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 87–91.

Федяева Галина Анатольевна

Родилась в 1957 году. В 1979 году окончила Брянский институт транспортного машиностроения по специальности «Городской электрический транспорт». Доктор технических наук, доцент. Опыт работы – 26 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета. Имеет 120 научных работ и 12 патентов.

Иньков Юрий Моисеевич

Родился в 1937 году. В 1954 году окончил Московский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Инженер-электромеханик путей сообщения». Доктор технических наук, профессор. В 1978 году защитил диссертацию по теме «Вероятностные методы расчета полупроводниковых преобразователей электроэнергии». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время – профессор кафедры «Электрическая тяга» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). Имеет более 200 научных трудов, в том числе монографии, и более 100 авторских свидетельств и патентов. Заслуженный деятель науки РФ, имеет 5 государственных наград, знаки «Почетный работник транспорта России» и «Почетный железнодорожник».

Тарасов Алексей Николаевич

Родился в 1979 году. В 2006 году окончил Уральский государственный университет

путей сообщения по специальности «Инженер путей сообщения». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает техническим директором ЗАО «Пензенский завод точных приборов». Имеет 9 научных работ и 12 патентов.

Конохов Дмитрий Владимирович

Родился в 1991 году. В 2014 году окончил Брянский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы – 2 года. В настоящее время работает инженером 1 категории в АО «Транснефть – Дружба». Имеет 6 научных работ и 5 патентов.

Fedyaeva Galina

Was born in 1957. In 1979 she graduated from Bryansk Transport Machine Building Institute with specialization in «City electric transport». She is a Doctor of Engineering Science, associ-

ate professor. Her work experience is 26 years. At present she works as professor at the department «Electronic, radio-electronic and electro-technical systems» of Bryansk State Technical University. She has 120 scientific works and 12 patents.

In'kov Yuriy

Was born in 1937. In 1954 he graduated from Moscow Institute of Railway Transport Engineers, speciality is «Railway transport engineer – electrician». He is a Doctor of Engineering, a professor. In 1978 he defended a thesis, the theme is «Probabilistic computing methods of power semiconductor converters». He has 50 year work experience. At present he works as a professor of «Electric traction» department of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT). He has more than 200 scientific works, including monographs and more than 100 author's certificates and patents. He is a Honored

scientist of Russia, he has 5 state awards, «Honored transport worker of Russia» and «Honored railway worker» signs.

Tarasov Aleksey

Was born in 1979. In 2006 he graduated from Ural State University of Railway Transport with specialization in «Railway engineer». His work experience is 15 years. At present he works as technical director in CJSC «Penzenskiy precision instrument factory». He has 9 scientific works and 12 patents.

Konokhov Dmitriy

Was born in 1991. In 2014 he graduated from Bryansk State Technical University with specialization in «Electric drive and automation of industrial machines and technological complexes». His work experience is 2 years. At present he works as first class engineer in JSC «Transneft-Druzhba». He has 6 scientific works and 5 patents.

Индуктивные датчики регистрации прохода колеса железнодорожной подвижной единицы. Проблемы и перспективы использования

// Inductive wheel sensor. Challenges and vistas of use //

Ляной В.В.,

НПЦ «Промэлектроника» УрГУПС, г. Екатеринбург

Индуктивные датчики регистрации прохода колеса находят широкое применение в системах СЦБ для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта. Внедрению таких датчиков на магистральном транспорте препятствуют трудности в обеспечении стабильности их работы в реальных условиях эксплуатации. В статье рассмотрены причины нестабильной работы датчиков. Предложено решение, позволяющее повысить надежность работы индуктивных датчиков регистрации прохода колеса во всем диапазоне износов рельса и колеса, допускаемых нормативной документацией, и расширяющее их функциональные возможности.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, система СЦБ, система счета осей, индуктивный датчик регистрации прохода колеса, безопасность движения, повышение надежности, расширение функциональных возможностей.

Inductive wheel sensors are widely used in the railway signalling to ensure the railway traffic safety. Implementation of such sensors on the main lines is impeded by the challenges of unstable operation in the actual operating conditions. The reasons why the wheel sensors operate unstable are considered in this article. The author proposes a solution for improving reliability of the sensor operation in the whole range of the rail and wheel wear stipulated by the normative documents and expanding its functionality.

Keywords: railway transport, signalling system, axle counting system, inductive wheel sensor, traffic safety, to improve reliability, to expand functionality.

Индуктивные датчики регистрации прохода колеса по участку пути, наряду с использованием рельсовых цепей, находят широкое применение в системах СЦБ для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта. На магистральном железнодорожном транспорте России в настоящее время эксплуатируются более 2,5 тыс. счетных пунктов системы ЭССО с датчиками регистрации прохода колеса, разработанными предприятием НПЦ «Промэлектроника». Еще более 20 тысяч таких датчиков эксплуатируются на промышленном транспорте и за рубежом.

Более широкому внедрению индуктивных датчиков регистрации прохода колеса на магистральном транспорте препятствуют трудности в обеспечении стабильности их работы в реальных условиях эксплуатации. В связи с этим для обеспечения необходимых показателей безопасности движения предложен ряд

решений – [1, 2, 3] и др. Но все они требуют использования большого количества избыточного оборудования. Такой путь не является оптимальным, так как уменьшает основные преимущества применения систем счета осей по сравнению с использованием РЦ. Поэтому исследование причин нестабильной работы индуктивных датчиков колеса и разработка решений, направленных на повышение их надежности, являются в настоящее время весьма важными и актуальными задачами.

Принцип работы и методы расчета индуктивных рельсовых датчиков регистрации прохода колеса

Рельсовые датчики прошли большой путь развития от простых механических устройств до сложных бесконтактных индуктивных датчиков, в которых определяется не только факт прохода колеса

железнодорожной подвижной единицы, но и его скорость, направление движения и диаметр колеса. И хотя во всех индуктивных датчиках как минимум одна из катушек играет роль основного чувствительного элемента, различают несколько принципов работы индуктивных датчиков регистрации прохода колеса:

- датчики на основе гистерезисных потерь и потерь вихревых токов;
- датчики, работающие на основе отклонения или изменения величины магнитного поля;
- датчики, в которых под действием материала реборды изменяется индуктивность сенсорных обмоток.

При анализе работы таких датчиков применяют методы общей теории электрических цепей и магнитных полей [4] и методы расчета датчиков перемещений, которые были разработаны специально для проектирования систем автоматического контроля [5]. Однако детерминированные методы расчета [6] не дают адекватной картины взаимодействия реборды колеса с датчиком и не обеспечивают надежной работы датчиков в системах счета осей. Причина данного явления заключается в том, что в отличие от рассматриваемых в теории систем промышленной автоматики магнитоэлектрическая система взаимодействия датчиков регистрации прохода колеса с рельсом и колесом является многопараметрической, конструктивно не жестко определенной, с большой степенью вариабельности (рис. 1а и 1б) и большим количеством внешних воздействующих факторов [7].

Две зоны чувствительности в датчике используются для определения направления движения колеса над датчиком, скорости и размера колеса.

Следует отметить, что датчиков, работающих только на основе гистерезисных потерь и потерь вихревых токов или только на основе отклонения или изменения магнитного потока, а также таких, в которых под действием материала

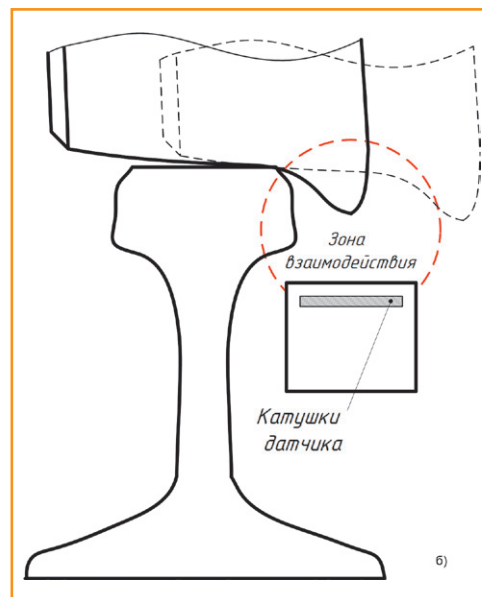
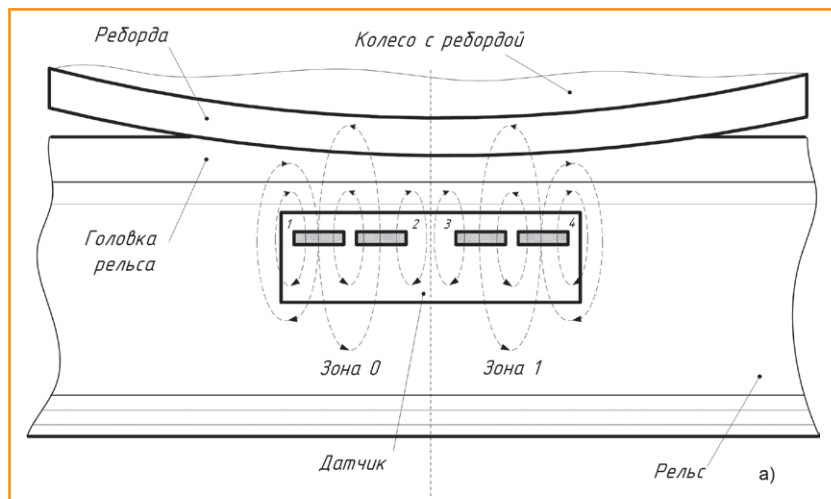


Рис. 1. Магнитоэлектрическая система взаимодействия датчиков регистрации прохода колеса: а) схема взаимодействия реборды колеса и индуктивного датчика колеса; б) боковое смещение реборды колеса относительно катушек датчика

реборды изменяется только индуктивность сенсорных обмоток, не существует. Все эти факторы в системе «Рельсовый датчик – рельс – колесо» в той или иной мере присутствуют одновременно. Поскольку представить такую сложную систему адекватно гипотетически не представляется возможным, все детерминированные методы расчета дают ошибки. В [8] было показано, что для анализа работы таких систем более результативными оказались графоаналитические методы исследований.

Результаты исследований причин нестабильной работы индуктивных датчиков регистрации прохода колеса

По методике, изложенной в [8], исследовался индуктивный датчик регистрации прохода колеса, магнитоэлектрическая система которого условно показана на рис. 1а, б.

На первом этапе исследовалась напряженность электромагнитного поля над поверхностью датчика на минимально возможном (6 мм) и максимально возможном (20 мм) расстояниях прохода реборды колеса от поверхности датчика. Затем была проведена оценка влияния рельса на изменение параметров (характеристик) этого электромагнитного поля. На заключительном этапе проведена оценка взаимодействия электромагнитного поля датчика с физическими имитаторами колеса (сначала в свободном пространстве, а затем – датчика, установленного на рельсе).

Чувствительность датчика колеса к проходу над его поверхностью физи-

ческих имитаторов реборды определялась по отклонению напряжения и частоты на выходе сенсорных обмоток датчика. Проход имитаторов реборды над поверхностью датчика осуществлялся с помощью специального приспособления для контроля датчика – ПКД (рис. 2).

Реборда прижималась к упору (на рис. 2 показан справа) и перемещалась вдоль оси симметрии датчика в продольном направлении с дискретностью, составляющей 1 см. Затем упор и, соответственно, реборда колеса сдвигались на 1 см в сторону от продольной оси симметрии датчика, и измерения повторялись.

Обобщенные результаты исследований представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3

показан характер изменения напряжения на выходе сенсорных обмоток зон 0 и 1 датчика, закрепленного на рельсе при проходах над ним имитатора реборды колеса на расстоянии 6 мм от его поверхности и различных расстояниях (от 0 до 7 см) от головки рельса.

По оси Z на рис. 3а показано отклонение напряжения в условных единицах от своего первоначального значения, когда реборда колеса над датчиком регистрации прохода колеса отсутствовала. По оси X показано отклонение гребня реборды от боковой поверхности головки рельса (в см), по оси Y – проход реборды колеса вдоль рельса над поверхностью датчика (в см). На рис. 3б по оси X показано отклонение реборды от боковой поверхности головки рельса

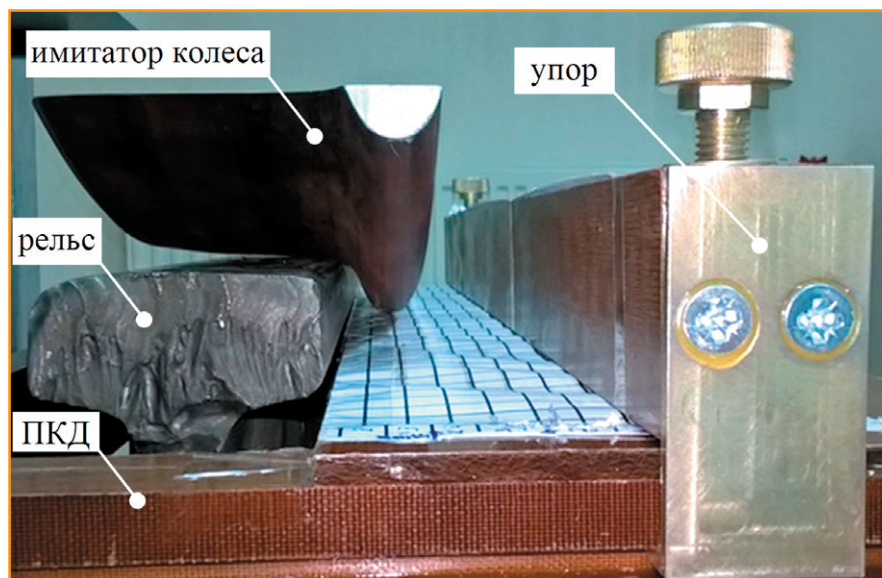


Рис. 2. ПКД – приспособление для контроля датчика

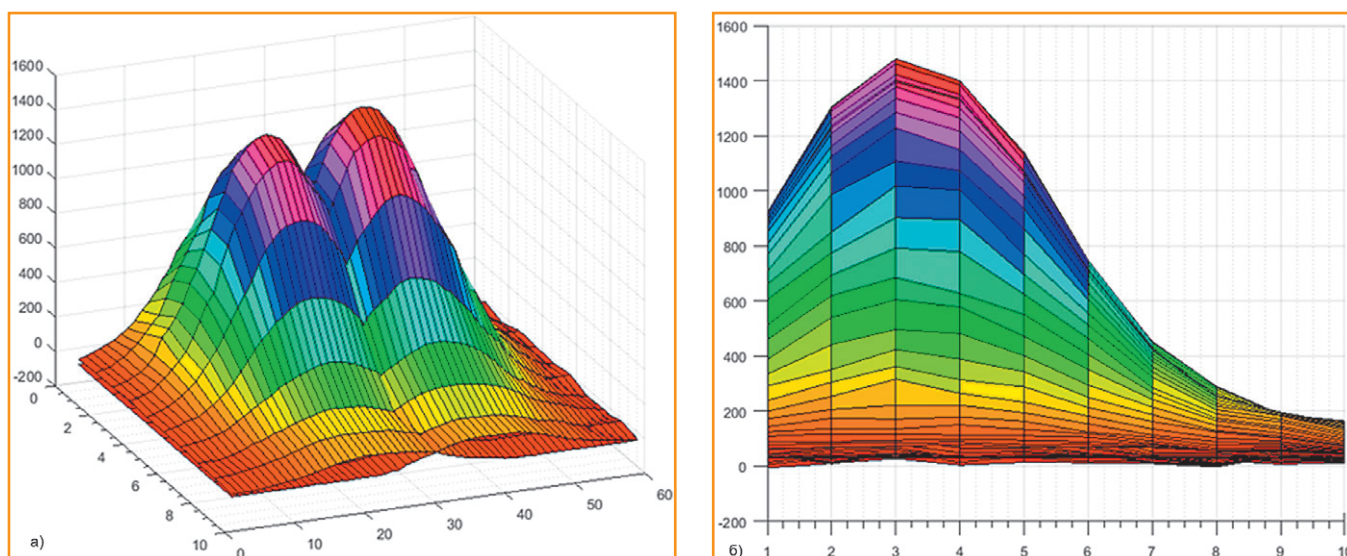


Рис. 3. Отклонение напряжения на выходе сенсорных катушек зон 0 и 1 у датчика, закрепленного на рельсе:
а) аксонометрия; б) сечение (вид спереди)

(в см), по оси Y – отклонение напряжения в условных единицах.

На рис. 4 показаны аналогичные диаграммы напряжений при проходах реборды колеса на максимально возможном удалении от поверхности датчика (20 мм).

Из этих данных видно, что максимальное значение амплитуды напряжения на выходе чувствительных элементов (зон 0 и 1) индуктивного датчика при проходе реборды колеса существенно (более чем в 10 раз) меняется в зависимости от расстояния до поверхности датчика и от расстояния, на котором реборда проходит относительно продольной оси симметрии датчика. При изменении расстояния про-

хода реборды до поверхности датчика от 6 до 20 мм этот сигнал изменяется более чем в 2,2 раза. При отклонении гребня реборды в сторону от продольной оси симметрии датчика на 40 мм он еще уменьшается не менее чем в четыре раза. В соответствии с правилами технической эксплуатации железных дорог РФ (ПТЭ) это отклонение может достигать 56 мм.

При использовании известных технологий регистрации прохода колеса по участку пути [9, 10] это неизбежно будет приводить к ошибкам определения диаметра колеса и к нестабильности регистрации прохода именно колеса железнодорожной единицы, то есть к сбоям в работе счетных пунктов.

Анализ возможных направлений повышения надежности и расширения функциональных возможностей индуктивных датчиков регистрации прохода колеса

Наиболее распространенным решением для регистрации прохода колесных пар подвижного состава по участку пути является использование по меньшей мере двух индуктивных датчиков колеса, расположенных на некотором расстоянии друг от друга вдоль рельса, регистрация напряжений (и/или частоты) на выходе сенсорных систем датчиков при отсутствии и проследовании над ними колеса и определение моментов максимального отклонения

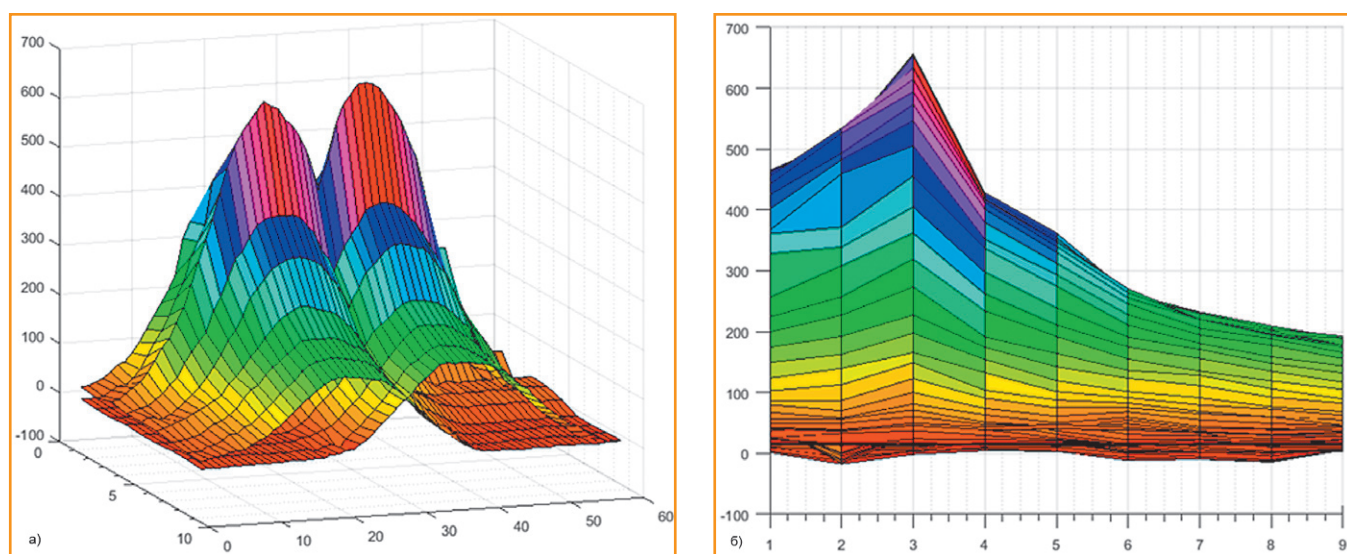


Рис. 4. Отклонение напряжения на выходе сенсорных катушек зон 0 и 1 при проходах реборды колеса над поверхностью датчика на расстоянии 20 мм: а) аксонометрия; б) сечение (вид спереди)

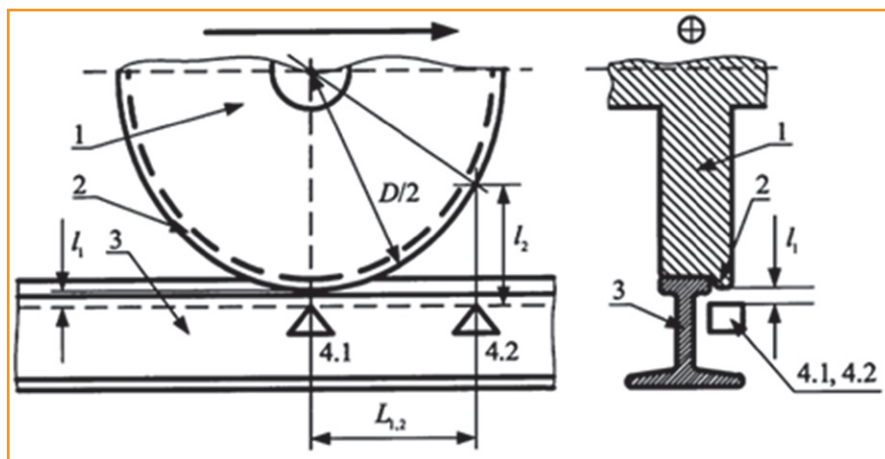


Рис. 5. Условное геометрическое расположение колеса 1, его реборды 2, рельса 3 и индуктивных датчиков колеса 4.1 и 4.2

напряжений на выходе первого и второго датчиков. Затем в результате цифровой обработки этих данных устанавливают направление движения, скорость прохода колеса и его диаметр, например, в соответствии с [9, 10].

На рис. 5 представлено условное геометрическое расположение колеса 1, его реборды 2, рельса 3 и индуктивных датчиков колеса 4.1 и 4.2.

Путем соответствующих тригонометрических преобразований можно получить следующее выражение, определяющее связь расстояния $L_{1,2}$ между датчиками 4.1 и 4.2, диаметром колеса D по реборде и высотой l_2 (некоторой условной точки реборды колеса над датчиком 4.2) в тот момент, когда расстояние между ребордой и датчиком 4.1 будет минимальным (то есть когда отклонение по напряжению на выходе датчика 4.1 от своего первоначального значения будет максимальным):

$$D = \frac{l_2^2 + L_{1,2}^2}{l_2}. \quad (1)$$

Решение относительно аргумента l_2 дает

$$l_2 = \frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} - L_{1,2}^2}. \quad (2)$$

Так как принцип работы основан на преобразовании наличия металлической массы колеса, находящейся в определенной близости от поверхности датчика, в выходной электрический сигнал переменного напряжения $U_{рд}$, то для него будет иметь место функциональная зависимость

$$U_{рд} = f(l_2). \quad (3)$$

Конкретный вид этой зависимости определяется рядом практических факторов: принципиальным построением рельсового датчика, частотой пере-

менного напряжения, напряженностью электромагнитного поля и т.п. Подстановка (2) в (3) позволяет получить выражение для определения выходного напряжения $U_{рд}$:

$$U_{рд} = f \left[\frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} - L_{1,2}^2} \right]. \quad (4)$$

Из (4) и рис. 5 следует, что при $L_{1,2} = \text{const}$ и прочих равных условиях напряжение на выходе рельсового датчика 4.2 в момент, когда колесо находится точно над датчиком 4.1, определяется только диаметром D колеса. При увеличении диаметра D амплитуда отклонения напряжения $U_{рд}$ будет увеличиваться, так как расстояние l_2 от реборды до датчика 4.2 будет становиться меньше. При уменьшении диаметра D расстояние l_2 увеличивается. Напряжение $U_{рд}$ становится меньше. Таким образом, разный диаметр колеса подвижного состава будет определять различные значения выходного напряжения на выходе рельсового датчика 4.2.

Из рис. 5 очевидно также, что при увеличении значения $L_{1,2}$ значение l_2 увеличивается, а следовательно, при каком-то его критическом значении величина $U_{рд}$ будет настолько мала, что определить диаметр проходящего колеса по методам, изложенным в [9, 10], становится принципиально невозможным. Это эквивалентно также тому, что при некотором фиксированном значении $L_{1,2}$ диаметры колес менее некоторого критического значения по данным методам определяться принципиально не будут. Понятно, что при $L_{1,2} \rightarrow 0$ значение l_2 уменьшается, и следовательно, $U_{рд}$ будет возрастать. Но уменьшать это расстояние менее какого-то определен-

ного значения невозможно по чисто конструктивным соображениям. Сказанное иллюстрируется данными, представленными на рис. 6.

На рис. 6 представлены реальные диаграммы напряжений на выходе первой и второй зон чувствительности одного из датчиков регистрации прохода колеса при проходе над ним реборды колеса диаметром 957 мм на разных расстояниях от боковой поверхности головки рельса и от поверхности датчика. Также представлена диаграмма напряжений при проходе реборды колеса меньшего диаметра (600 мм) на расстоянии 6 мм от поверхности датчика и на расстоянии 30 мм от боковой поверхности головки рельса (то есть для наиболее благоприятного случая для прохода колеса данного диаметра).

Точками а и с на графиках обозначена область обнаружения напряжения над зоной чувствительности 0 датчика, точками б и д – область обнаружения напряжения над зоной чувствительности 1 датчика.

Анализ этих данных показал следующее.

1. Отклонение напряжения на выходе зон чувствительности 0 и 1 датчика регистрации прохода колеса зависит не только от расстояния, на котором реборда проходит от поверхности датчика и от боковой поверхности головки рельса, но и от диаметра колеса.

2. При уменьшении диаметра колеса наблюдается сужение области обнаружения реборды датчиками колеса (рис. 6а и 6д). При этом уровень напряжения на выходе второго датчика в момент, когда напряжение у первого датчика достигает своего максимального значения, падает. При колесах меньшего диаметра это напряжение становится меньше порога обнаружения (точки а и б на диаграммах).

3. Это напряжение падает и может стать ниже порога обнаружения по напряжению и в том случае, когда реборда отклоняется от боковой поверхности головки рельса (рис. 6с) или проходит от поверхности датчиков на максимально возможном, но допустимом по нормам ПТЭ удалении (рис. 6б).

Из сказанного следует, что известные в технике способы регистрации прохода колесных пар подвижного состава [8, 9] имеют ограничения по скорости и/или диаметру колеса, при которых каждый из них может использоваться.

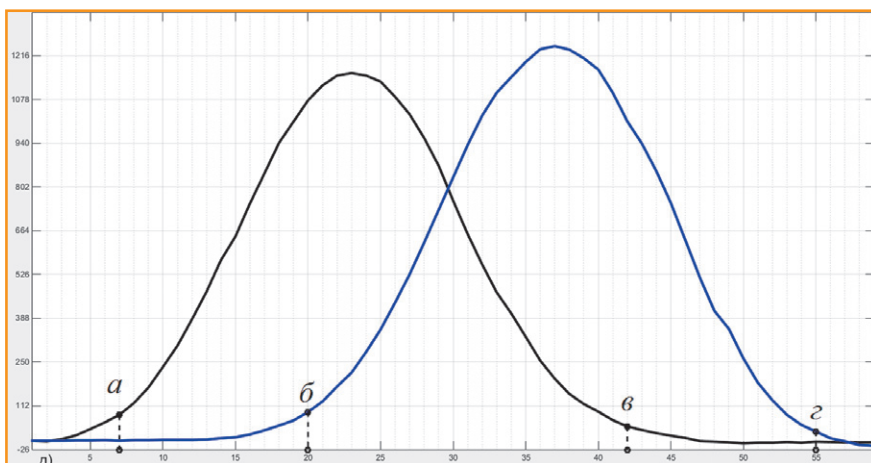
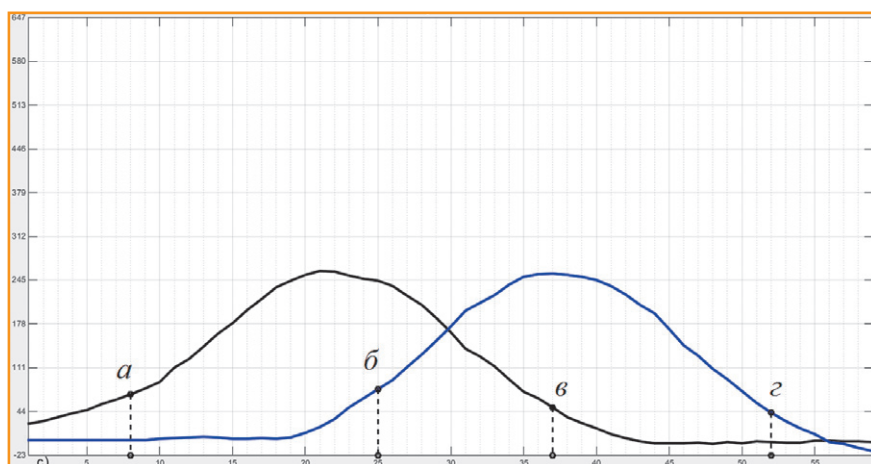
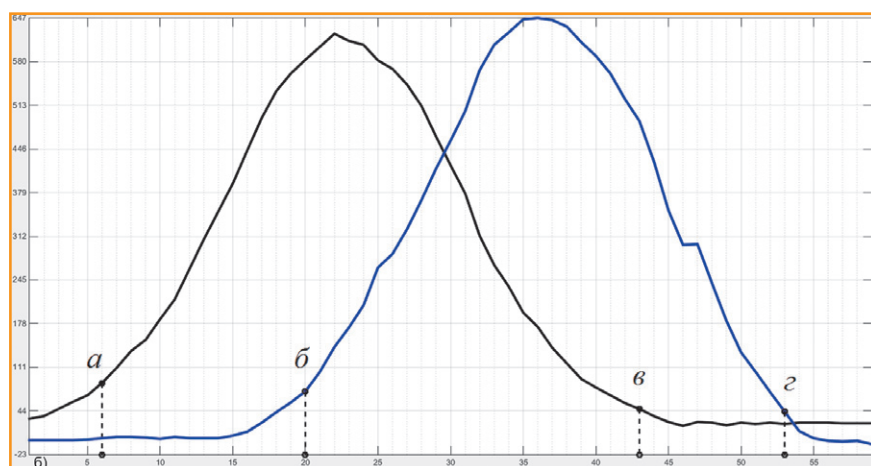
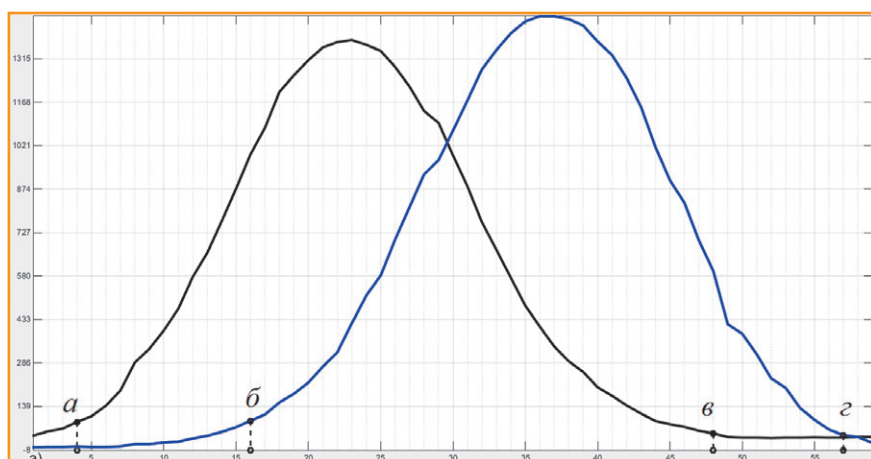


Рис. 6. Диаграммы изменения напряжения на выходе первого и второго индуктивных датчиков при проходе реборды колеса: а) диаметром 957 мм на расстоянии 30 мм от головки рельса и 6 мм от поверхности датчика; б) диаметром 957 мм на расстоянии 30 мм от головки рельса и 20 мм от поверхности датчика; в) диаметром 957 мм на расстоянии 60 мм от головки рельса и 20 мм от поверхности датчика; д) диаметром 600 мм на расстоянии 30 мм от головки рельса и 6 мм от поверхности датчика

Для снятия этих ограничений предлагается следующее.

Предварительно в память контроллера датчика регистрации прохода колеса заносят информацию об изменении напряжений на выходе индуктивных датчиков 1 и 2 (зон чувствительности 0 и 1 датчика) в виде некоторого k наборов функций $U_1 = F_1(l)$ и $U_2 = F_2(l)$ при имитации прохода реборды колеса конкретных диаметров на некоторых фиксированных расстояниях от поверхности датчика и от боковой поверхности головки рельса. Во время работы датчиков проводят регистрацию изменения выходных напряжений на выходе индуктивных датчиков в реальном масштабе времени, преобразуют эти данные относительно расстояния в виде функций напряжения $U_1 = f_1(l)$, $U_2 = f_2(l)$, затем сравнивают эти данные с набором аналогичных функций $U_1 = F_1(l)$, $U_2 = F_2(l)$, которые занесены в память контроллера, где l – расстояние по ходу движения колеса относительно некоторой опорной точки. По полученным функциям устанавливают факт прохождения над индуктивными датчиками именно реборды колеса и его диаметр.

Выводы

1. Надежность регистрации прохода колеса падает при отклонении реборды колеса в сторону от боковой поверхности головки рельса и износах колеса и рельса.

2. Использование графоаналитического метода исследований индуктивного датчика регистрации прохода колеса [8] позволяет получить информацию о надежности регистрации прохода колеса в зависимости от расстояния, на котором реборда колеса проходит от боковой поверхности головки рельса, и от степени износа колеса и рельса.

3. Необходимая надежность регистрации прохода колеса может быть обеспечена только при учете всех возможных комбинаций прохода колеса над датчиком в соответствии с износом колеса и рельса.

4. Наихудшим условием для регистрации прохода колеса индуктивными датчиками является взаимодействие проходящего колеса, имеющего неизношенную поверхность катания, с рельсом, имеющим максимально изношенную боковую поверхность головки рельса.

5. Надежность работы и функциональные возможности индуктивных датчиков регистрации прохода колеса могут быть улучшены, если функции отклика датчика преобразовать в функции отклика относительно расстояния l.

Литература

1. Althage Klaus, Thalbauer Rudolf. Error-tolerant axle counting method for the rail vehicles, using redundant and digitally-optimized wheel signals and count signals at all counting locations. Заявка на изобретение № DE102005048852, МПК В61L/16, опубликовано 20.04.2006.
2. Ohmstede Hartwig. Verfahren und Anordnung zum Überwachen eines durch

zwei Achszähl-Sensoreinheiten begrenzten Streckenabschnitts. Заявка на изобретение № DE102012217591, МПК В61L23/00, опубликовано 27.03.2014.

3. Lin Zhen, Wang Quanchen, Cheng Bo. Modular axle counting system. Заявка на изобретение № CN104192172, МПК В61L1/16, опубликовано 10.12.2014.

4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники [Текст]: учебник. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

5. Федоров А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля. – Омск: Ом ГТУ, 2011.

6. Щиголев С.А., Сергеев Б.С. Анализ работы электромагнитного путевого датчика ДПЭП // Электротехника, № 7, 2000, с. 41. ISSN 0013–5860.

7. Frauscher J. From track switch to inductive wheel sensor using a variety of technologies. SIGNAL + DRAHT (98) 1+2/2006.

8. Ляной В.В. Обеспечение безопасности движения железнодорожного транспорта на основе совершенствования индуктивных датчиков регистрации колеса // Транспорт Урала, № 2 (49), 2016. – С. 93.

9. Тильк И.Г., Ляной В.В., Кривда М.А., Сергеев Б.С. Способ фиксации проследования колеса подвижного состава по участку пути

и устройство для его осуществления. Патент № RU 2323120 (С1), МПК В61L 1/16, В61L 25/00, опубликовано 27.04.2008, бюл. № 12.

10. Frauscher Josef. Method for acquiring the diameter of a wheel of a moving railway vehicle. Заявка на изобретение № EP 1630518 (A2), МПК G01B7/12, опубликовано 01.03.2006. Опубликовано также как EP1630518 (A3) и DE102004041803 (A1).

Ляной Вадим Вадимович

Родился в 1963 году. В 1986 году окончил УЭМИИТ по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Опыт работы – 32 года. В настоящее время работает директором по развитию бизнеса АО «НПЦ «Промэлектроника» и учится в аспирантуре УрГУПС.

Lyanoi Vadim

Was born in 1963. In 1986 he graduated from Ural State University of Railway Transport with specialization in «Automation, telemechanics and communication on railway transport». He has 32 years of work experience. At present he works as Business development director of Research and production center «Promoelectonica» and studies at postgraduate school of Ural State University of Railway Transport.

О критериях отнесения продукции радиоэлектроники к промышленной продукции, не имеющей аналогов, произведенных в Российской Федерации

Приложение к постановлению Правительства Российской Федерации от 17 июля 2015 года № 719 «О критериях отнесения промышленной продукции к промышленной продукции, не имеющей аналогов, произведенных в Российской Федерации» дополнено разделом «Продукция радиоэлектроники», включающим интегральные схемы первого и второго уровней.

Согласно постановлению критериями отнесения промышленной продукции к промышленной продукции, не имеющей аналогов, произведенных в Российской Федерации, являются:

а) отсутствие на территории Российской Федерации производства этой продукции, подтвержденного в порядке, установленном Министерством промышленности и торговли Российской Федерации с учетом:

- требований к промышленной продукции, предъявляемых в целях ее отнесения к продукции, произведенной в Российской Федерации, согласно приложению к постановлению;
- специального инвестиционного контракта (при наличии);

б) отличие определенных постановлением параметров этой продукции от параметров произведенной в Рос-

сийской Федерации промышленной продукции, определяемое в порядке, установленном Министерством промышленности и торговли Российской Федерации.

В дополненном постановлением Правительства Российской Федерации от 09 августа 2016 года № 764 «О внесении изменений в приложение к постановлению Правительства Российской Федерации от 17 июля 2015 г. № 719» разделе «Продукция радиоэлектроники» определены следующие требования к интегральным схемам, предъявляемые в целях их отнесения к продукции, произведенной в Российской Федерации.

1. Наличие у производителя интегральных схем прав на конструкторскую и технологическую документацию, а также на их топологию.

2. Осуществление на территории Российской Федерации следующих операций:

- разработка структуры, логической и (или) электрической принципиальной схемы интегральных схем, топологии интегральных схем;
- разработка (в том числе создание программного кода) программного обеспечения для интегральных схем; из-

готовление пластин по полному циклу (за исключением фотошаблонов) с кристаллами и их измерение;

- сборка кристаллов в корпусе;
- измерение и испытание интегральных схем;
- проектирование и разработка интегральных схем;
- испытание интегральных схем.

Постановлением не допускается использование при проектировании и разработке интегральных схем готовых схемотехнических решений иностранного производства.

Перечисленные критерии и требования будут использоваться в целях применения мер стимулирования деятельности в сфере промышленности, а также в целях установления условий, запретов и ограничений допуска интегральных схем иностранного производства.

Критерии не распространяются на интегральные схемы, предназначенные для использования в стратегически значимых системах военного, двойного и специального назначения.

Краснов Л.А.

Редакция журнала «Электроника и электрооборудование транспорта»

О внесении изменения в Гражданский кодекс РФ

Роспатент предложил внести изменения в Гражданский кодекс РФ. Изменения направлены на совершенствование правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности.

Предлагается внести изменения в статьи четвертой части ГК РФ, предусматривающие:

- исключение требования нотариального удостоверения доверенности, предоставляемой любому лицу применительно к ведению дел по государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности и распоряжения исключительными правами;
- упрощение порядка внесения изменений в охранные документы за счет сохранения за Роспатентом обязанности внесения в охранный документ только изменений, устраняющих очевидные и технические ошибки;
- возможность любому лицу получить выписку из реестров, содержащих сведения о зарегистрированных объектах интеллектуальной собственности;
- ограничение охраны в качестве полезной модели только технических решений, относящихся к устройству, не имеющему составных частей, или

состоящему из двух и более частей, соединенных между собой сборочными операциями и находящимся в функционально-конструктивном единстве, в частности, исключение предоставления правовой охраны архитектурным объектам и другим стационарным сооружениям, комплектам, комплексам;

- ограничение количества подаваемых одним заявителем заявлений о публичном предложении заключить договор об отчуждении патента на изобретение, освобождающий от уплаты пошлины (не более чем по десяти заявкам в год);
- ограничение периода, в который возможна подача заявления о преобразовании заявки на полезную модель в заявку на изобретение или промышленный образец либо заявки на промышленный образец в заявку на изобретение или полезную модель (только в период проведения экспертизы заявки или рассмотрения в Роспатенте возражения против решения о выдаче патента, об отказе в выдаче патента или о признании заявки отозванной);
- исключение направления заявителю отчета о поиске, проводимом

при проведении экспертизы заявки на изобретение по существу (предусмотренного пунктом 3 статьи 1386 ГК РФ). Получение отчета о поиске будет возможно только в случае подачи ходатайства, предусмотренного пунктом 4 статьи 1386 ГК РФ, и уплаты дополнительной пошлины, значительно превышающей размер пошлины за проведение экспертизы заявки по существу;

- возможность восстановления срока уплаты пошлины за регистрацию и выдачу патента;
- приостановление и засекречивание заявки на промышленный образец в случае, если содержащиеся в ней сведения составляют государственную тайну, а также возможность отзыва заявителем заявки на промышленный образец или преобразования ее в заявку на секретное изобретение;
- устранение противоречий и неточностей, содержащихся в действующей редакции ГК РФ.

Краснов Л.А.

Редакция журнала «Электроника и электрооборудование транспорта»

Перечень статей, напечатанных в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» в 2016 году

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Страницы
Раздел «ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ»				
1	Об основных направлениях развития мировой транспортной системы и логистики	Владимиров С.А.	1	2–8
2	Автомобилестроительная корпорация «КАМАЗ»	Сарбаев В.И., Бородулин В.В., Бугримов В.А.	4	2–4
Раздел «ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ, СВЯЗИ»				
3	Поддержание надежности электронных систем управления двигателем в эксплуатации	Баженов Ю.В., Каленов В.П.	2	2–5
4	Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля	Шаронов Г.И., Нефедьев А.И.	3	2–4
Раздел «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ»				
5	Математическое моделирование дуги в свече зажигания автомобиля	Петровский С.В., Козловский В.Н., Шевцов В.А.	1	9–12
6	Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов	Штанг А.А., Ярославцев М.В.	1	13–16
7	Оценка гармонических составляющих тягового тока в системе электро-снабжения метрополитена при работе 12-пульсовых выпрямительных агрегатов	Бадёр М.П., Гречишников В.А., Шевлюгин М.В., Данг Вьет Фук	1	17–21
8	Простой способ энергосбережения в тяговой сети переменного тока	Герман Л.А., Сухов М.Ю., Кишкурно К.В., Муреев П.А., Кузов Д.А., Фроловский А.В.	1	22–27
9	Исследование износа изоляции ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях	Попов Ю.И.	1	28–32
10	Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электро-снабжения летательных аппаратов. Девятифазная система напряжений и восемнадцатипульсное выпрямление	Коняхин С.Ф., Коняхин В.С., Третьяк В.И.	2	6–10
11	Система критериев качества для оценки перспективных систем автоматического управления скоростью грузовых поездов с распределенной тягой	Киселев М.Д., Пудовиков О.Е.	2	11–14
12	Электромагнитные процессы в системе тягового электроснабжения с МФ ВДТ при включении его вольтодобавочной обмотки в отсасывающую линию	Косарев А.Б., Алексеев М.В.	2	15–20
13	Сетевая коммутация выпрямительно-инверторного преобразователя в зависимости от параметров контактной сети и числа секций электровоза	Савоськин А.Н., Литовченко В.В., Болдин Д.И.	2	21–26
14	Совершенствование алгоритмов автоматики интеллектуального терминала ИнТер-27,5 НИИЭФА-ЭНЕРГО	Герман Л.А., Ишкин Д.В., Якунин Д.В.	2	27–32
15	Магнитоэлектрический генератор стабилизированного напряжения в широком диапазоне частот вращения	Гусев С.А., Приказчиков А.В., Нестерин В.А., Спиридонов А.А.	3	5–7
16	Расчет параметров электрического поля в земле с неоднородной электрической структурой при стекании тока с искусственного заземлителя	Косарев А.Б., Косарев Б.И.	3	8–12
17	Математическая модель переходной зоны слаботочных электрических контактов в условиях запыленности	Люминарская Е.С., Дианов В.Н.	3	13–15
18	Использование водорода в автомобильном транспорте	Овсянников Е.М., Ключкин П.Н., Гайтова Т.Б.	3	15–18
19	Автоматические быстродействующие выключатели для городского электротранспорта	Мурадов Э.Ш., Грицук А.А.	3	19–24
20	Развитие бортовых устройств регистраторов для воздушных судов	Попов Ю.В.	4	5–12
21	Повышение мощности импульсных преобразователей постоянного напряжения с использованием многофазных структур	Ютт В.Е., Сидоров К.М., Гулямов К.Х.	4	13–16
22	Моделирование систем тягового электроснабжения с коаксиальными кабелями и отсасывающими трансформаторами	Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты	4	17–22

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Страницы
23	Методика определения сопротивления изоляции транспортных средств	Высоцкий В.Е., Новикова А.П.	4	23–26
24	Двухступенчатая установка поперечной емкостной компенсации в тяговых сетях железных дорог	Серебряков А.С., Герман Л.А., Якунин Д.В., Максимова А.А., Маралова В.А.	4	27–31
25	Продление срока эксплуатации силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока железных дорог	Воприков А.В.	4	32–34
26	Технологические аспекты зарядной инфраструктуры для электромобилей	Оспанбеков Б.К., Голубчик Т.В., Сидоров К.М.	4	35–38
27	Развитие бортовых устройств регистраторов для воздушных судов. Часть 2	Попов Ю.В.	5	2–5
28	Совершенствование грозозащиты пунктов питания цепей управления железнодорожных путей	Киселев А.А., Михайлов Ю.А., Нестерцев И.А.	5	6–10
29	Экспериментальное исследование режимов работы импульсных преобразователей постоянного напряжения трехфазной структуры при активной и активно-индуктивной нагрузках	Ютт В.Е., Голубчик Т.В., Гулямов К.Х.	5	11–14
30	К практическому применению управляемого компенсатора жесткости на неодимовых магнитах	Панченко Ю.В., Курбатов В.С., Макаров С.В.	5	15–17
31	Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами	Ким К.К., Ткачук А.А.	5	18–21
32	Развитие системы тягового электроснабжения постоянного тока повышением напряжения в тяговой сети до 24 кВ и ее адаптация для высокоскоростных магистралей	Бадёр М.П.	6	2–7
33	Определение установившейся температуры полупроводников автономного инвертора напряжения	Космодамианский А.С., Стрекалов Н.Н., Пугачев А.А.	6	8–12
34	Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена	Сидоренко В.Г., Чжо М.А.	6	13–16
35	Оценки погрешности и помехоустойчивости тракта аналого-цифрового преобразования в системах автоматического контроля и управления	Баранов Л.А., Яцкова Т.А.	6	17–23
36	Состояние вопроса о вспомогательных машинах отечественных электровазозов переменного тока	Малютин А.Ю.	6	24–28
37	Аналитические аспекты возможности выравнивания напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока	Гречишников В.А., Шаламай И.В., Куров Н.Д., Власов С.П.	6	29–31
38	Математическая модель взаимодействия клиентских групп пешеходов внутри транспортного узла	Искаков Т.А., Сидоренко В.Г.	6	32–34
39	Система автоматического управления скоростью движения, использующая эталонную модель поезда	Киселев М.Д., Пудовиков О.Е.	6	35–38
40	Интеллектуальная система защиты ответственных участков движения скоростных железнодорожных магистралей	Ким К.К., Ткачук А.А., Таразанов И.И., Чукарин В.С., Васильковская Н.В.	6	39–42
Раздел «МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА»				
41	Совершенствование вспомогательного электропривода электрического подвижного состава	Плак А.В., Евстафьев А.М., Якушев А.Я., Теличенко С.А.	1	33–37
42	Комбинированное управление асинхронным двигателем с фазным ротором	Доманов В.И., Доманов А.В., Чугунов К.А.	1	38–40
43	Определение температуры обмоток тягового асинхронного двигателя введением дополнительных составляющих напряжения	Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А.	2	33–48
44	Параметры кинематических перемещений осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой группового тягового привода с технологическими погрешностями установки при работе первой ступени рессорного подвешивания	Кручек В.А., Евстафьев А.М.	2	39–42
45	Влияние тяговых и тормозных характеристик коллекторного и асинхронного привода на энергетическую эффективность электровазозов переменного тока	Власьевский С.В., Малышева О.А., Мельниченко О.В., Грибенюк Д.В.	3	25–31
46	Автоматизированная система вентиляции электродвигателя	Доманов В.И., Доманов А.В., Сердцева А.В.	3	32–34
47	Безотказность тяговых электродвигателей электропоездов серии ЭТ-2М в различных межремонтных периодах	Скребков А.В., Шарапов А.А.	3	35–36
48	Моделирование динамики мехатронной платформы с лазерным координатором ориентирования судна на створ	Деева В.С., Ивойлов Е.В., Слободян С.М., Цупин А.А.	4	39–43
49	Методика диагностирования электромеханического усилителя рулевого управления безредукторного типа	Денисов И.В., Смирнов А.А.	5	22–24
50	Расчет и анализ схемы наблюдателя скорости двигателя постоянного тока	Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А. Карим	5	25–27

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Страницы
51	Определение положений коммутации вентильно-индукторного двигателя при регулировании среднего значения момента в зоне низких скоростей	Красовский А.Б.	5	28–32
52	Оптимизация энергетических характеристик электропривода вспомогательных механизмов тягового подвижного состава	Иньков Ю.М., Пугачев А.А.	6	43–47
Раздел «ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ»				
53	Мезаэпитаксиальные GaAs-вариакпы для ВЧ-аппаратуры	Сурайкин А.И.	1	41–44
Раздел «ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ»				
54	Комплексный анализ качества электрооборудования автомобилей по результатам гарантийной эксплуатации	Козловский В.Н., Киреев К.В., Заятров А.В.	3	41–46
Раздел «ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ»				
55	Разработка концептуальной модели диагностики системы зажигания электрооборудования автомобилей на основе интеллектуально-информационной системы	Петровский С.В., Козловский В.Н., Дуспулов М.Г.	4	44–47
РАЗДЕЛ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ»				
56	Передача электрической энергии электромагнитными полями и их воздействие на окружающую среду	Бадёр М.П.	2	43–47
57	Математическое моделирование электромагнитных помех от системы зажигания автомобиля	Петровский С.В., Козловский В.Н., Белаушкин Е.В.	3	37–40
58	Методы анализа электромагнитной совместимости	Аполлонский С.М., Горский А.Н.	5	33–38
59	Электромагнитная совместимость электроустановок и сетей нетягового электроснабжения с электрифицированными железными дорогами переменного тока	Косарев А.Б., Косарев Б.И.	5	39–44
Раздел «ИНФОРМАЦИЯ»				
60	О контроле и надзоре в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского назначения, созданных за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета	Краснов Л.А.	1	45
61	О применении положений ранее действовавшего законодательства в области интеллектуальной собственности	Краснов Л.А.	1	46
62	Об ознакомлении с документами заявки на выдачу патента на изобретение, полезную модель, промышленный образец	Краснов Л.А.	1	47
63	О типовом государственном (муниципальном) контракте на выполнение НИОКР	Краснов Л.А.	3	47
64	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	Краснов Л.А.	3	47
65	О возмещении части затрат, связанных с уплатой пошлин при патентовании за рубежом	Краснов Л.А.	5	45
66	Об изменении осуществления государственными заказчиками управления правами Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения	Краснов Л.А.	5	46
67	О правилах закрепления исключительного права на результат интеллектуальной деятельности, созданный по государственному контракту до 1 января 2008 года	Краснов Л.А.	5	47

Сведения об авторах

Д.т.н.**Козловский Владимир Николаевич**
+7-917-978-83-56**К.т.н., доцент****Терешкин Владимир Михайлович**
+7-917-775-32-41**Д.т.н., профессор****Герман Леонид Абрамович**
+7-908-769-94-26**К.т.н., доцент****Гурова Елена Геннадьевна**
+7-913-949-21-36**Д.т.н., профессор****Иньков Юрий Моисеевич**
+7-495-684-23-90**Д.т.н., доцент****Федяева Галина Анатольевна**
+7-4832-56-36-02**Веселов Павел Александрович**
+7-963-778-79-74**Ляной Вадим Вадимович**
+7-343-378-85-39

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.