

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

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

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

Свидетельство
о регистрации СМИ
ПИ №ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
А.Г. Бабак, к.т.н.

Редакционный совет:

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

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук.

Редакция:

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

Подписано в печать:
9.02.2015 г.

Отпечатано:

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

Формат 60x90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 70.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Владимиров С.А.

Об основных направлениях развития мировой транспортной системы и логистики 2

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Петровский С.В., Козловский В.Н., Шевцов В.А.

Математическое моделирование дуги в свече зажигания автомобиля 9

Штанг А.А., Ярославцев М.В.

Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов 13

Бадер М.П., Гречишников В.А., Шевлюгин М.В., Данг Вьет Фук

Оценка гармонических составляющих тягового тока в системе электроснабжения метрополитена при работе 12-пульсовых выпрямительных агрегатов 17

Герман Л.А., Сухов М.Ю., Кишкурно К.В., Муреев П.А., Куров Д.А., Фроловский А.В.

Простой способ энергосбережения в тяговой сети переменного тока 22

Попов Ю.И.

Исследование износа изоляции ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях 28

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Плак А.В., Евстафьев А.М., Якушев А.Я., Теличенко С.А.

Совершенствование вспомогательного электропривода электрического подвижного состава 33

Доманов В.И., Доманов А.В., Чугунов К.А.

Комбинированное управление асинхронным двигателем с фазным ротором 38

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ

Сурайкин А.И.

Мезаэпитаксиальные GaAs – варикапы для ВЧ-аппаратуры 41

ИНФОРМАЦИЯ

Краснов Л.А.

О контроле и надзоре в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского назначения, созданных за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета 45

Краснов Л.А.

О применении положений ранее действовавшего законодательства в области интеллектуальной собственности 46

Краснов Л.А.

Об ознакомлении с документами заявки на выдачу патента на изобретение, полезную модель, промышленный образец 47

Об основных направлениях развития мировой транспортной системы и логистики

// On main directions of development of the global transport system and logistics //

**Владимиров С.А., д.э. н.,
Северо-Западный институт управления РАНХиГС,
г. Санкт-Петербург**

В статье, на основании опыта развитых стран и стратегии развития отечественного транспорта, обоснованы основные направления развития мировой и отечественной транспортных систем.

Ключевые слова: стратегия, транспорт, конкуренция, инновации, макроэкономика, качество, политика, эффективность.

Транспорт – третья ведущая отрасль материального производства. Он обеспечивает производственные связи промышленности и сельского хозяйства, осуществляет перевозки грузов и пассажиров, является основой географического разделения труда, способствуя специализации и кооперированию предприятий, отраслей, районов и стран. Без транспорта было бы невозможно преодоление территориального разрыва между производством и потреблением товаров и услуг [1]. Транспорт подразделяют на сухопутный (железнодорожный и автомобильный), водный (морской и речной), воздушный, трубопроводный и электронный (линии электропередачи).

Автомобильный транспорт с середины XX века стал ведущим среди видов сухопутного транспорта. Протяженность его сети растет и достигла в настоящее время 27,8 млн км, причем около 1/2 приходится на США, Индию, Россию, Японию, Китай. По уровню автомобилизации в мире лидируют США и страны Западной Европы. Автомобильному транспорту принадлежит также первенство в объеме пассажирских перевозок – 82% мирового объема.

Железнодорожный транспорт уступает автомобильному по объему перевозимых грузов (9% мирового объема), но по-прежнему остается важным ви-

The article, based on the experience of developed countries and development of the national transport strategy, proved the main directions of development of the global and domestic transportation system.

Keywords: strategy, transport, competition, innovation, macroeconomics, quality, policy effectiveness.

дом сухопутного транспорта. Мировая железнодорожная сеть в целом сложилась еще в начале XX века, ее протяженность сейчас составляет 13,2 млн км при значительной неравномерности размещения. Хотя железные дороги имеются в 140 странах мира, более 1/2 их общей длины приходится на «первую десятку» стран: США, Россию, Канаду, Индию, Китай, Австралию, Аргентину, Францию, ФРГ и Бразилию. Особенно по густоте сети выделяются страны Европы. Но наряду с этим имеются огромные пространства, где железнодорожная сеть очень редка или отсутствует.

Трубопроводный транспорт активно развивается благодаря быстрому росту добычи нефти и природного газа и тому территориальному разрыву, который существует между главными районами их добычи и потребления. Трубопроводный транспорт обслуживает 11% объема мирового грузооборота при протяженности сетей, составляющей более 2,0 млн км.

Водный транспорт прежде всего характеризуется выдающейся ролью морского транспорта. На него приходится 62% мирового грузооборота, он также обслуживает около 4/5 всей международной торговли. Именно благодаря развитию морского транспорта океан уже не разделяет, а соединяет страны и континенты. Общая протяженность

морских трасс составляет миллионы километров. Морские суда транспортируют главным образом массовые грузы: нефть, нефтепродукты, уголь, руду, зерно и другие, причем обычно на расстояние 8–10 тыс. км. «Контейнерная революция» на морском транспорте привела к быстрому росту перевозок и так называемых генеральных грузов – готовых изделий и полуфабрикатов. Морские перевозки обеспечиваются морским торговым флотом, общий тоннаж которого превышает 456 млн т. Первенство в мировом судоходстве принадлежит Атлантическому океану, второе место по размерам морских перевозок занимает Тихий океан, третье – Индийский. Очень большое влияние на географию морского транспорта оказывают международные морские каналы (особенно Суэцкий и Панамский) и морские проливы (Ла-Манш, Гибралтарский и др.).

Внутренний водный транспорт – старейший вид транспорта. Сейчас он занимает по длине сети последнее место в мировой транспортной системе. Развитие и размещение внутреннего водного транспорта в первую очередь связаны с природными предпосылками – наличием рек и озер, пригодных для судоходства. Амазонка, Миссисипи, Волга, Обь, Енисей, Янцзы, Конго имеют большую пропускную способность, чем самые мощные железнодорожные магистрали. Но использование этих предпосылок зависит от общего уровня экономического развития. Поэтому по грузообороту внутренних водных путей в мире выделяются США, Россия, Канада, ФРГ, Нидерланды, Бельгия, Китай. Большое значение в некоторых странах имеют также судоходство по искусственным путям и озерное судоходство.

Воздушный транспорт. Этот вид наиболее скоростного, но достаточно дорогостоящего транспорта играет важную роль в международных пассажирских перевозках. Его преимущества

кроме скорости – качество поставок, географическая мобильность, позволяющая легко расширять и менять трассы. Сеть регулярных авиалиний теперь опоясывает весь земной шар, протягиваясь на миллионы километров. Ее опорные точки – более 5 тысяч аэропортов. Главные воздушные державы мира – США, Россия, Япония, Великобритания, Франция, Канада, ФРГ.

Мировая транспортная система

Все пути сообщения, транспортные предприятия и транспортные средства в совокупности образуют мировую транспортную систему. Она сформировалась в XX веке и испытывает на себе сильное воздействие НТР, что выражается в «разделении труда» между отдельными видами транспорта, увеличении пропускной способности транспортных путей, появлении принципиально новых транспортных средств, например, сверхскоростных поездов на воздушной подушке.

Объем и структура транспортных перевозок, как правило, отражают уровень и структуру экономики, а география транспортной сети и грузопотоков – размещение производительных сил. Количественными показателями транспортной системы являются протяженность путей сообщения, численность занятых, грузо- и пассажирооборот. Во-первых, это относится к мировой транспортной сети, общая протяженность которой превышает 50 млн км. Во-вторых, это относится к транспортным средствам. Достаточно сказать, что перевозки грузов по железным дорогам осуществляют более 210 тыс. локомотивов и миллионы железнодорожных вагонов, по автодорогам – свыше триллиона автомобилей, по морским трассам – более 90 тыс. судов, а по воздушным трассам – более 30 тыс. рейсовых самолетов. Общая грузоподъемность всех перевозочных средств мирового транспорта уже превысила 2,0 млрд тонн. В-третьих, это относится к работе транспорта, который ежегодно перевозит свыше 110 млрд т грузов и более триллиона пассажиров. Численность занятых на транспорте превышает 100 млн человек (что можно сравнить со всем населением Филиппин).

Основные параметры мировой транспортной системы. Изменение транспортоемкости мирового хозяйства характеризуется известной устойчивостью за послевоенный период: и суммарный грузооборот, и общий пассажиро-

оборот росли примерно теми же темпами (с некоторым отставанием), что и общий валовой продукт, рассчитанный в неизменных ценах. За этот период удельный мировой грузооборот на 1 т произведенной продукции вырос на 1/3, а душевой грузооборот и километрическая подвижность населения выросли в 3,5–4 раза.

Общая протяженность транспортной сети по видам путей сообщения в последние десятилетия существенно стабилизировалась, в то же время происходит значительное качественное изменение сети: растет протяженность электрифицированных и скоростных железных дорог, автомагистралей с усовершенствованным покрытием, трубопроводов крупного диаметра. Данные о перевозках показывают масштабность выполняемой транспортной работы: душевой оборот за 40 лет вырос с 3,0 тыс. до 3,4 тыс. пассажиро-километров. Можно отметить динамизм развития перевозок. Объем перевозочной работы вырос более чем в 7 раз, а к 2020 году вырастет еще в 1,2–1,3 раза.

В мировом грузообороте резко выделяется морской транспорт, доля которого постепенно возросла и до сих пор почти не снижается с 52 до 62%. То же можно сказать и о доле в пассажирообороте легкового автомобильного индивидуального транспорта – с 57 до 60%. Происходит интенсивное изменение структуры перевозок между отдельными видами транспорта. Так, в грузообороте соотношение между железнодорожным и его главным конкурентом – автомобильным транспортом – изменилось с 4:1 до 1,2:1 с последующим ростом – превышением доли автотранспорта. Доля трубопроводов выросла с 4,2% до 12,8%. В пассажирообороте воздушный транспорт приблизился к уровню железнодорожного – соответственно, 10,0% и 10,2%, а к 2020 году должен превысить его.

Огромное влияние на развитие всех видов транспорта оказала «контейнерная революция», в результате которой транспортировка грузов осуществляется в специальных металлических емкостях – контейнерах. Появились также новые транспортные средства – контейнеровозы и специальные перегрузочные станции – терминалы. Это позволило повысить производительность труда на транспорте в 7–12 раз.

Мировая транспортная система неоднородна, и в ней можно выделить

транспортные системы экономически развитых и развивающихся стран, несколько региональных неоднородных транспортных систем: Северной Америки, Зарубежной Европы, стран СНГ, Азии, Латинской Америки, Австралии. При этом длина транспортных сетей развитых стран составляет 81% общей длины мировой транспортной сети, и на них приходится 78% мирового грузооборота и примерно 80% по стоимости, а доля ее в мировом пассажирообороте еще выше. Густота транспортной сети, в наибольшей мере характеризующая обеспеченность ею, в большинстве развитых стран составляет 50–60 км на 100 км территории, а в развивающихся – 5–10 км. В экономически развитых странах сосредоточено более 80% мирового автомобильного парка, в них находится почти 2/3 всех портов мира, выполняется 3/4 мирового грузооборота. Для этой транспортной подсистемы характерен также высокий технический уровень.

С момента зарождения транспорт оказывал сильное влияние на окружающую среду. Главными загрязнителями атмосферы являются автомобильный транспорт, воздушный транспорт и железнодорожный транспорт, эти виды транспорта создают также шумовое загрязнение и требуют больших площадей для сооружения магистралей, заправочных станций, стоянок, вокзалов и т.д. (за исключением воздушного). Водный транспорт главным образом служит источником загрязнения нефтью океанов и внутренних вод.

Современные процессы урбанизации находятся в сложной зависимости от развития городских и пригородных пассажирских сообщений. За последние 25 лет процесс субурбанизации привел к сокращению доли поездок в центры городов из пригородов США с 35 до 10%. В среднем по странам Европейского Союза 50% перемещений в городах совершаются на легковых автомобилях, 12% – пешком, 20% – автобусом, трамваем, метрополитеном, 15% – на велосипедах и мопедах, 3% – городской железной дорогой. По подсчетам специалистов, развитие средств информатики и связи снижает потребность в деловых поездках на 20–25% и в бытовых поездках – даже на 50%.

Особую часть мировой транспортной системы составляют транспортные коридоры и узлы. В систему международных транспортных коридоров вхо-

дят также экспортные и транзитные магистральные трубопроводы. Создавшиеся в конце прошлого века транспортные коридоры, проходящие через территории нескольких стран, объединяют сразу несколько видов транспорта. Из совокупности маршрутов они превратились в систему управляющих центров перевозок и транспортных узлов, которые постепенно приобрели функции управления тарифной политикой.

Важной перспективной тенденцией является сращивание транспортных и экспедиционно-распределительных предприятий. В узлах, обеспеченных надежными и скоростными транспортными связями (воздушными и морскими контейнерными линиями) создаются крупные специализированные транспортно-распределительные центры международного значения (Париж, Марсель, Франкфурт-на-Майне, Мюнхен и др.).

В транспортной системе узлы выполняют функцию регулирующих клапанов. Сбой в работе одного такого клапана может привести к проблемам для всей системы. Крупные транспортные узлы всегда являются крупными городами, потому что притягивают торговлю, здесь удобно развивать промышленность, да и сами транспортные терминалы предоставляют много рабочих мест. Очень многие города возникли на пересечении наземных или водных путей, то есть как транспортные узлы.

Крупнейший транспортный узел России – Москва. Здесь пересекаются пути пяти видов транспорта: в Москве сходятся 11 железнодорожных лучей, 15 автомагистралей, 5 газопроводов и 3 нефтепровода; здесь есть три речных порта, пять аэропортов и девять вокзалов. Самый крупный транспортный узел страны на Дальнем Востоке – Владивосток, где кончается Транссибирская железная дорога и начинаются многие морские пути. Некоторые города выполняют роль не грузовых, а пассажирских транспортных узлов. Например, Симферополь в Крыму, куда прибывают многочисленные туристы, пересаживающиеся там на транспорт, доставляющий их в города крымского побережья.

Научно-техническая революция оказала большое воздействие на «разделение труда» между отдельными видами транспорта. В мировом пассажирообороте внеконкурентное первое место (около 4/5) теперь принадлежит автомобильному транспорту, в мировом грузо-

обороте – морскому транспорту (почти 2/3). Характерными результатами научно-технической революции на мировых транспортных рынках являются постоянный рост конкурентоспособности различных видов транспорта, усиление потенциальной возможности их взаимозаменяемости, развитие интермодальных сообщений. Наиболее острой конкуренции на транспортных рынках подвержены сухопутные виды транспорта – железнодорожный, автомобильный, трубопроводный, а также речной – особенно в тех случаях, когда они обеспечивают доставку грузов до морских портов. Проходящая параллельно с научно-технической революцией монополизация транспортных средств только обостряет конкуренцию.

Воздействие государства на развитие и функционирование транспорта. Транспорт широко используется как оружие региональной политики. В условиях усиления избыточности и противоречивости развития транспорта усиливаются протекционистские и дискриминационные экономические, фискальные и правовые меры государства, направленные на смягчение конкуренции и защиту национальных транспортных компаний. Усиливается использование «своих» транспортных средств для расширения «невидимого» экспорта (перевозки грузов иностранными фрахтователями и т.д.). «Дерегулирование» воздушного транспорта в США, появление чартерных авиакомпаний-аутсайдеров обостряют конкуренцию на воздушном фрахтовом рынке, ведут к снижению коммерческой загрузки самолетов. «Война флагов», политика попустительства по отношению к флагам «удобств» вызывают дезорганизацию фрахтового рынка, ведут к недогрузке тоннажа. Из 690 млн т дедвейта мирового флота около 180 млн т избыточны (из них 80 млн т – на приколе), даже суда-контейнеровозы используются лишь на 60–65%.

Ужесточение природоохранных предписаний и мер значительно усиливает избыточность транспортных мощностей и удорожает транспортный процесс. С учетом дороговизны территории более 10 млн т танкерного тоннажа используются в качестве плавучих нефтяных емкостей-складов в прибрежных водах ряда стран (например, Японии). Используются танкеры и в качестве зернохранилищ в акваториях портов развивающихся стран в связи с тем, что склад-

ское хозяйство их портов не подготовлено к столь быстрому росту ввоза зерна.

Взаимодействие и переплетение этих факторов вызывает сложное противоречивое развитие всей мировой транспортной системы. С одной стороны, общая тенденция – ускорение транспортного процесса: скоростные железные дороги, контейнерные сообщения, быстроходные специализированные суда; с другой – снижение ходовых скоростей судов для поглощения избыточности тоннажа, снижение скоростей и на других видах транспорта с целью уменьшения энергозатрат. Противоречивые и взаимодополняющие тенденции – формирование мощных полимагистралей, транспортных коридоров для повышения эффективности транспортного процесса. С другой стороны, дисперсия транспортных потоков, строительство сравнительно мелких высокоспециализированных транспортных средств, контейнеров с четкой «адресностью» назначения, развитие фидерных путей сообщения, обеспечивающих подвоз-развоз.

Обостряются противоречия между развитием подвижного состава и постоянных устройств, между линейными и узловыми элементами системы. Возможности портов обычно отстают от перевозок, образуются иерархические системы портов с целью концентрации капиталовложений, в то же время усиливается конкуренция между ними. Возникает диспропорция между портами стран-отправителей и портами стран-получателей. Отсюда усиление тенденции избежать портовых устройств, организовать бесперегрузочные системы (суда «Река – море», баржевозы, паромы, накатные суда и т.д.). Крупной проблемой мирового значения оставалось до последнего времени отсутствие глубоководных портов на Атлантическом побережье США (порты принимали суда до 70 тыс. т). Далеко идущие последствия вызывает то обстоятельство, что доля развивающихся стран в мировом морском тоннаже – всего 25%, тогда как в мировом отправлении грузов – более 50%.

Одна из причин избыточности транспортных мощностей – обострение конкуренции между железнодорожным и автомобильным транспортом (в США затраты у автотранспорта – 60%, тогда как доля в грузообороте – 26%, а доля в энергопотреблении транспорта – 85%). От «перехвата» грузов автомобильным транспортом и от «вторжения» автомо-

бия в сферу железных дорог экономика США теряет, по некоторым подсчетам, около 2 млрд долл. в год.

Стоимостные характеристики перевозок любой продукции (транспортный тариф) отражаются непосредственно на ее конечной цене, прибавляются к затратам на производство, влияют на конкурентоспособность продукции и зону ее сбыта. Стоимость перевозок в пассажирском сообщении ограничивает возможности для поездок населения, а во многих случаях для части населения с невысокими доходами делает эти поездки недоступными. Удешевление пассажирского сообщения, смягчающее эти ограничения, имеет не только большое социальное, но и экономическое значение. Городской транспорт субсидируется в основном государством, региональными и местными органами власти. Однако их участие в этом различно. В одних странах государственные инвестиции обеспечивают всю сумму единовременных и текущих затрат (Бельгия, Голландия), в других они практически не используются (Канада, Дания, Великобритания).

Эти типичные для современной и перспективной транспортной ситуации тенденции и процессы, тесно взаимодействующие с процессом мирового развития, требуют тщательного исследования на междисциплинарном уровне. Между тем общий уровень изученности мирового транспорта как системы стал снижаться.

Транспортная система России

В Российской Федерации, как и в других развитых странах, транспорт является одной из крупнейших базовых отраслей хозяйства, важнейшей составной частью производственной и социальной инфраструктур. Транспортные коммуникации объединяют все районы страны, что является необходимым условием ее территориальной целостности, единства ее экономического пространства. Они связывают страну с мировым сообществом, являясь материальной основой обеспечения внешнеэкономических связей России и ее интеграции в глобальную экономическую систему. О месте и значении транспорта свидетельствует также его значительный удельный вес в основных производственных фондах страны (в 2012 году – 29%), существенная доля транспортных услуг в валовом внутреннем продукте

(в 2013 году – 9%), в инвестициях на развитие отраслей экономики (в 2013 году – 11,4%) и в численности занятых работников (в 2013 году – 6,8%), а также в потреблении энергоресурсов, металла и в ряде других важных показателей, характеризующих экономику страны.

Все эти обстоятельства позволяют отнести транспорт к числу приоритетных отраслей экономики.

В настоящее время российская экономика оказалась перед системным вызовом, характер и качество которого определяются сочетанием трех фундаментальных факторов. Первый фактор – усиление глобальной конкуренции. Второй фактор – возрастание роли человеческого капитала в социально-экономическом развитии. Третий фактор – исчерпание источников экспортно-сырьевого типа развития, базирующихся на интенсивном наращивании топливного и сырьевого экспорта. Одновременно в России появились существенные ограничения роста экономики, обусловленные недостаточным развитием транспортной системы. Сегодняшние объемные и качественные характеристики транспорта, особенно его инфраструктуры, не позволяют в полной мере и эффективно решать задачи растущей экономики.

Основные общесистемные проблемы развития транспортной отрасли Российской Федерации состоят в следующем: наличие территориальных и структурных диспропорций в развитии транспортной инфраструктуры; недостаточный уровень доступности транспортных услуг для населения, мобильности трудовых ресурсов; недостаточное качество транспортных услуг; низкий уровень экспорта транспортных услуг, в том числе использования транзитного потенциала; недостаточный уровень транспортной безопасности; усиление негативного влияния транспорта на экологию.

Еще одной важной проблемой является недостаточный уровень конкурентоспособности отечественных компаний и всей транспортной системы России в целом на мировом рынке транспортных услуг. Это обусловлено как перечисленными проблемами, так и недостаточными возможностями отечественных транспортных организаций конкурировать на мировом рынке, в том числе эффективно использовать геополитические преимущества России при транзитных междуна-

родных перевозках. Технические и технологические параметры международных транспортных коридоров нашей страны не обеспечивают их конкурентоспособность на международном рынке. Интеграция в мировой и региональные рынки транспортных услуг будет означать усиление конкуренции, расширение доступа на российский рынок зарубежных перевозчиков, снятие административных и тарифных барьеров и приведет к ослаблению положения отечественных транспортных компаний.

Основные направления развития мировой транспортной системы

Анализ мировых тенденций развития транспорта показывает, что ни одна страна не способна контролировать риски собственной экономики, не имея сильных транспортных позиций. Мировые тенденции в развитии транспорта свидетельствуют, что закончен период протекции по отношению к видам транспорта и перевозчикам. На современном этапе мировая транспортная система характеризуется большой зависимостью от информационных технологий и развивается по следующим направлениям: увеличение пропускной способности транспортных путей, повышение безопасности движения, появление принципиально новых транспортных средств, увеличение вместимости и грузоподъемности транспортных средств, увеличение скорости передвижения, своевременности, ритмичности и экологичности функционирования транспортной системы. Новые требования клиентуры к качеству транспортного обслуживания отодвигают затраты на второй план.

Усилия большинства стран направлены на повышение конкурентоспособности национального транспорта и отказ от системы квот, а также от тарифных и других ограничений. Их заменяет гармонизация транспортного законодательства; рынок транспортных услуг стал усложняться, все сегменты транспортного процесса и логистики стали интегрироваться. Как естественный результат – развитие транспортной инфраструктуры нового типа – транспортно-складские и товаро-транспортные комплексы, которые образовали объединенную систему взаимодействия; транспортные центры стали управляющими элементами системы, что позволило оптимизировать «сквозные» тарифы.

Это привело к переходу точки прибыльности из процессов физической

перевозки в область транспортно-логистических услуг. На этом фоне усиливаются требования к экологичности транспорта. Отсюда стремление поддерживать приемлемую долю транспортной составляющей в цене конечной продукции при соблюдении жестких норм по экологии и безопасности.

В долгосрочной перспективе в странах с рыночной экономикой ожидается дальнейшее развитие НТП на транспорте. Структура сети путей сообщения претерпит существенные изменения. НТП на транспорте позволит существенно улучшить его экономические показатели, повысить качество обслуживания клиентуры и безопасность движения. На транспорте намечаются широкое использование маркетинга, изучение спроса, введение учета потребностей, применение моделирования и т.д. Ожидается освоение на всей сети путей сообщения компьютерной системы Райлинк (соединяющей между собой в настоящее время железные дороги, клиентов и банки) или другой аналогичной ей системы, что позволит включить транспорт в сеть коммерческих обменов. Протяженность малодетальных и нерентабельных железнодорожных линий и участков будет сокращаться. В то же время предполагается сооружение ряда новых, в основном скоростных, линий. Предстоит также продолжить работу по обеспечению совместимости информационных систем, чтобы связать между собой национальные компьютерные сети.

Существенные изменения произойдут в парке транспортных средств. Их численность несколько возрастет, и заметно увеличится доля прогрессивных видов тяги. Повысится доля специализированного подвижного состава, его грузоподъемность и удельная мощность. Современными учеными и изобретателями разработан инновационный транспорт, поражающий воображение. Представьте, что более чем миллиард автомобилей, которые путешествуют по всему миру и потребляют триллионы долларов в виде материальных ресурсов, топлива и вредных выбросов, работают без выбросов в течение 100 лет только на 8 граммах топлива каждый! В США разрабатывается новый тип автомобильных двигателей из одного из самых плотных материалов, известных в природе, – тория, имеющего огромный потенциал производства тепла путем ис-

пользования лазерных нанотехнологий.

Безусловно перспективными инновационными транспортными средствами являются дирижабли, подводные круизные и грузовые корабли (особенно для Арктики), струнный транспорт, частные космические аппараты вплоть до туров на Луну и Марс [2].

Новая Транспортная стратегия России

При переходе к интенсивному, инновационному, социально ориентированному типу развития Россия стремится стать одним из лидеров глобальной экономики, что требует активной позиции государства по созданию условий для социально-экономического развития, прежде всего в целях повышения качества транспортных услуг, снижения совокупных издержек общества, зависящих от транспорта, повышения конкурентоспособности отечественной транспортной системы и качества жизни населения через доступ к безопасным и качественным транспортным услугам, усиления инновационной, социальной и экологической направленностей развития транспортной отрасли, превращения географических особенностей России в ее конкурентное преимущество. В этих условиях формирование стратегических направлений развития отечественного транспорта должно осуществляться на базе всестороннего анализа современного состояния и проблем развития транспортной системы в тесной взаимосвязи с общими направлениями и масштабами социально-экономического развития страны, а также с глобальными общемировыми стратегическими тенденциями в экономике.

Новая редакция Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства от 11 июня 2014 года № 1032-р, разработана с учетом Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года, Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года, Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу, Стратегии развития транспортного машиностроения Российской Федерации в 2007–2010 годах и на период до 2015 года, Стратегии развития авиационной промышленности на период

до 2015 года, Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2020 года и других отраслевых стратегий в сфере промышленности, энергетики, лесного комплекса и сельского хозяйства, Стратегии социально-экономического развития регионов России. Оптимальным уровнем для увязки стратегии развития транспортной системы с региональными приоритетами признан уровень федерального округа.

Цели современной Транспортной стратегии России: формирование единого транспортного пространства России на базе транспортно-экономического баланса страны, предусматривающего гармоничное опережающее развитие эффективной транспортной инфраструктуры, обеспечивающей ускорение движения потоков пассажиров, товародвижения, снижение транспортных издержек в экономике, рост предпринимательской и деловой активности, непосредственно влияющей на качество жизни и уровень социальной активности населения; обеспечение доступности, объема и конкурентоспособности транспортных услуг для грузовладельцев в соответствии с потребностями инновационного развития экономики страны; обеспечение доступности и качества транспортных услуг для населения в соответствии с социальными стандартами; удовлетворение в полном объеме растущих потребностей населения по передвижению, отсутствие дефицита мощностей, высокая пропускная способность и техническая оснащенность транспортной инфраструктуры, ликвидация ограничений на развитие существующих и освоение новых территорий, а также повышение ценовой доступности социально значимых услуг транспорта; интеграция в мировое транспортное пространство, реализация транзитного потенциала страны, формирование в России транспортной инфраструктуры мирового уровня и превращение экспорта транспортных услуг в один из крупнейших источников доходов страны; повышение уровня безопасности и устойчивости транспортной системы, обеспечение эффективной работы аварийно-спасательных служб, гражданской обороны, подразделений специальных служб и повышение уровня мобилизационной готовности, создание необходимых условий для соответствующего уровня общенациональной безопасности и сниже-

ния террористических рисков; снижение негативного воздействия транспортной системы на окружающую среду.

Развитие транспортной инфраструктуры играет ключевую роль в реализации транспортной стратегии. Основными направлениями в развитии инфраструктуры железнодорожного транспорта являются развитие скоростного (160–200 км/ч) и высокоскоростного (250–350 км/ч) пассажирского движения; для автодорожной инфраструктуры – достижение соответствия между спросом и предложением пропускной способности дорожной сети в условиях роста парка транспортных средств, исходя из перспективного уровня автомобилизации страны – порядка 80 автомобилей на 100 домохозяйств (300 автомобилей на 1000 жителей); для воздушного транспорта – создание систем охраны контура аэродромов и посадочных глиссад; для морского транспорта – внедрение систем автоматизированной проводки судов с использованием спутниковых навигационных систем с созданием электронных карт внутренних водных путей; для трубопроводного транспорта – развитие трубопроводной транспортной инфраструктуры в восточных регионах страны в соответствии с приоритетами обеспечения надежного газоснабжения российских потребителей и диверсификации экспорта энергоносителей с учетом требований законодательства по охране природы; увеличение пропускных возможностей Балтийской трубопроводной системы до 62 млн тонн нефти в год позволит увеличить возможности России по экспорту нефти независимо от других стран [4].

Исходя из прогнозов возможных тенденций и ориентиров подъема российской экономики и преобразования социальной сферы можно предложить следующие сценарные варианты будущего развития транспортной системы страны: инерционный вариант, энерго-сырьевой вариант; инновационный вариант. Инновационный тип экономического роста выдвигает новые требования к транспорту и основным параметрам его развития с учетом следующих обстоятельств.

1. При сохранении главных функций транспортной системы (инструмент единства национальных товарных рынков и взаимосвязи регионов; фактор, создающий и организующий единое экономическое пространство; источник

развития территориального разделения труда и реализации сравнительных конкурентных преимуществ; условие обеспечения безопасности страны; средство перемещения и роста подвижности населения) масштабы, направления и стратегия развития транспорта должны носить опережающий характер по сравнению с параметрами социально-экономического развития страны в целом. Только при таком подходе транспорт не будет фактором, сдерживающим социально-экономическое развитие.

2. В условиях глобализации мировой экономики транспорт наряду с финансовой и информационной сферами выступает важнейшим рычагом интеграционных процессов. Особая роль транспорта определяется тем, что благодаря транспорту структурируется рыночная экономика, формируется единое экономическое пространство.

3. Проблема повышения конкурентоспособности товаров и услуг для экономики России является ключевой на современном этапе развития. Речь может идти об использовании ее транзитного потенциала, связанного с особым географическим положением страны как естественного транспортного коридора, соединяющего Европейский, Азиатско-Тихоокеанский регионы и Американский континент (прежде всего, создание надежного и эффективно действующего механизма перевозок между Европой и Азией по Транссибирскому маршруту, воссоединенному с Транскорейской железной дорогой и железными дорогами Монголии в качестве одного из основных маршрутов доставки контейнеров из Китая в Европу, и в перспективе – строительство Азиатско-Тихоокеанской железнодорожной магистрали Сингапур – Бангкок – Пекин – Якутск – туннель под Беринговым проливом – Ванкувер – Сан-Франциско); повышение уровня безопасности транспортной системы; снижение вредного воздействия транспорта на окружающую среду [5].

4. Намечившаяся за последнее время открытость национального транспортного рынка предьявляет новые требования к уровню конкурентоспособности транспорта. Со всей очевидностью обнаруживаются ограничения, связанные с неразвитостью единой транспортной системы, разногласиями в налоговой, тарифной, инвестиционной политике, что свидетельствует об отсутствии еди-

ной транспортной политики, эффективных механизмов ее формирования и реализации [6].

5. В современной транспортной системе особое место занимает пространственная мобильность населения, которая пока не адекватна не только требованиям инновационного типа экономического роста, но и потребностям рыночной экономики. Исследования показывают, что в целом мобильность населения в России существенно ниже, чем в странах с развитой рыночной экономикой. Согласно оценкам до 1/3 регионов находятся за чертой бедности, население этих регионов не имеет экономических возможностей покинуть эти регионы, что, в частности, может служить объяснением того, почему в России не наблюдается сближения регионов по уровню доходов [7].

Выводы

Транспортная система Российской Федерации является частью мировой транспортной системы. В ближайшие годы в нашей стране могут возникнуть серьезные инфраструктурные ограничения транспортной доступности отдельных регионов и товародвижения в международных и внутренних перевозках. Возможна потеря Россией отдельных перспективных мировых товарных рынков. Транспортная система может стать фактором торможения экономического роста.

Реализация Транспортной стратегии Российской Федерации, координация на основе ее положений действий всех ветвей и уровней власти, бизнеса, различных слоев общества обеспечит наиболее эффективное использование возможностей транспорта в интересах социально-экономического развития России, решения вышеуказанных системных социально-экономических проблем.

Литература

1. Мишарин А.С. Транспортная стратегия Российской Федерации: цели и приоритеты // Инновационный транспорт. 2015. № 1 (15). С. 3–7.
2. Бондур В.Г., Левин Б.А., Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Космический мониторинг транспортных объектов. Учебное пособие / Москва, 2015.
3. Лёвин Б.А., Круглов В.М., Матвеев С.И., Коугия В.А., Цветков В.Я. Геоинформатика транспорта (монография) / Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 3–2. С. 223.

4. Лapidус Б.М., Мачерет Д.А., Фортон В.Е., Железнов М.М., Махутов Н.А., Мирошниченко О.Ф., Колесников В.И., Левин Б.А., Пехтерев Ф.С., Фомин В.М., Титов Е.Ю., Розенберг Е.Н., Коссов В.С., Верескун В.Д., Лapidус В.А., Лapidус В.А., Белый С.Н., Корчагин А.Д., Рышков А.В. Научное обеспечение инновационного развития и повышения эффективности деятельности железнодорожного транспорта / Коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / Под редакцией д-ра экон. наук, проф. Б.М. Лapidуса. Москва, 2014. (Москва)
5. Барышников С.О., Разухина А.А. Алгоритм оптимального планирования работы портовых перегрузочных машин / В сборнике: Морское образование: традиции, реалии и перспективы. Материалы научно-практической конференции. 2015. С. 7–14.
6. Владимиров С.А. О некоторых причинах несбалансированности экономических си-

стем и направлениях налоговой политики // Налоги – журнал. 2010. № 2. С. 34–42.

7. Горбунов А.А. Транспорт – механизм развития региона // Научно-аналитический журнал Обозреватель – Observer. 2014. № 7 (294). С. 78–83.

Владимиров Сергей Арсеньевич

Родился в 1953 году. В 1975 году окончил Ленинградскую военно-инженерную Краснознаменную академию им. А.Ф. Можайского по специальности «Строительство наземных и подземных сооружений военных объектов». Доктор экономических наук, академик Российской академии естествознания. В 2008 году защитил диссертацию по теме «Методология оценки и анализа экономической эффективности инвестиционных проектов в строительстве». Опыт работы – 45 лет. В настоящее время работает профессором кафедры общего менеджмента

и логистики Северо-Западного института управления РАНХиГС. Имеет более 150 публикаций, в том числе в международных журналах.

Vladimirov Sergei

Was born in 1953. In 1975 he graduated from Leningrad Military Engineering academy with degree in «Construction of above-ground and underground constructions of military facilities». He is a Doctor of Economics, academician of the Russian Academy of Natural History. In 2008 he defended a thesis «The methodology of evaluation and analysis of the economic efficiency of investment projects in building». He has 45 years of work experience. At the present time he works as professor at the General management and logistics department of the North West Institute of the management. He has more than 150 academic papers, including international journals.

Математическое моделирование дуги в свече зажигания автомобиля

// Mathematic modelling of an arc in an automobile spark plug //

Петровский С.В., Козловский В.Н., д.т.н., Шевцов В.А., СамГТУ, г. Самара

В статье представлены результаты разработки и исследования математических моделей дугообразования в системе зажигания автомобиля.

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

The article describes results of development and investigation of mathematic models of arcing in the automobile ignition.

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

С точки зрения обеспечения требуемых характеристик работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при зажигании топливо-воздушной смеси в камере сгорания необходимо, чтобы дуговой разряд между электродами свечи зажигания был устойчивым и надежным. Экспериментальные исследования по данной проблеме проводятся, но они сложны и, учитывая множество режимов работы, в полной мере не дают ответа на вопрос энергетической устойчивости дугового разряда, поэтому решение задачи по исследованию электродуговых процессов, проходящих в системе зажигания автомобилей, рационально проводить на основе математического моделирования.

Величинами, которые полностью характеризуют дугу, являются ток и напряжение. Зависимость, связывающая ток и напряжение дуги, и будет ее математической моделью. При моделировании необходимо предварительно выбрать вид уравнения, связывающего ток и напряжение. Затем по опытным данным определяются коэффициенты или параметры этого уравнения.

Выбор структуры определяет возможности дальнейшего моделирования. Поэтому требуется использовать все имеющиеся в распоряжении сведения о наиболее общих свойствах объекта моделирования и в первую очередь результаты его аналитического исследования.

Аналитическая модель дуги как элемента электрической цепи базируется на исследовании уравнения переноса энергии. Это связано с тем, что тепловые процессы в дуге относятся к наиболее инерционным, и в основном они определяют ее динамические свойства [1].

Рассмотрим, следуя подходу, предложенному Брауном [1], один из методов получения структуры модели дуги:

$$\frac{dQ}{dt} = W - P, \quad (1)$$

где Q – теплосодержание, W и P – мощности тепловыделения и теплоотвода.

В дуговом створе не происходит накопления энергии электромагнитного поля, поэтому описание дугового разряда в интегральных параметрах при переходном режиме удобно вести через активную проводимость разрядного канала, которая является функцией теплосодержания:

$$g = F(Q). \quad (2)$$

Учитывая то, что тепловыделение в дуге можно считать только протеканием по ней тока, то после преобразований получим математическую модель дуги:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{F(Q)} \frac{dF(Q)}{dQ} (ui - P). \quad (3)$$

Известен ряд динамических моделей, основанных на различных представлениях механизма переноса энергии в створе дуги [1].

В представленной работе рассматриваются три наиболее распространенные на практике модели дугообразования в системе зажигания. Также в работе проведено сравнение моделей с использованием экспериментальных данных.

Подобрав наиболее подходящий для системы зажигания тип модели, можно использовать ее для построения новой модели определения уровня электромагнитных помех. Делается это для того, чтобы создать систему с динамической настойкой параметров для реальных систем, базирующихся на данных новой апробированной модели определения уровня электромагнитных помех.

Математическая модель Майра получена из рассмотрения процессов в дуге при допущении, что рассеивание тепловой энергии в радиальном направлении обусловлено только теплопроводностью. Этот подход базируется на предположении термической ионизации и постоянства диаметра ствола дуги в переходном режиме. Иными словами, мощность, выделяющаяся в дуге, постоянна и не зависит от изменения тока, а с током изменяется температура дуги.

$$\text{При } F(Q) = g_0 e^{\frac{Q}{Q_0}}, \quad P = P_0 = \text{const}, \quad (4)$$

где g_0 , Q_0 , P_0 – постоянные, мы получим модель Майра. В результате была получена модель дуги в следующей форме:

$$\frac{\Theta}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{ui}{P_0} - 1, \quad \Theta = \frac{Q_0}{P_0}. \quad (5)$$

$$\text{Так как } g = \frac{i}{u}, \quad \text{а } \frac{du_{c_i}}{dt} = \frac{i}{c_i},$$

то с учетом этого уравнение (3) в параметрах U , I можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u} \frac{du_c}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right). \quad (6)$$

Математическое описание процессов дугообразования на основании модели Касси получено в предположении, что в процессе охлаждения продольно обдуваемой дуги преобладает конвекционный отвод тепла, пропорциональный сечению дуги, при фиксированной температуре в пространстве и времени. Иными словами, этот анализ основан на предположении, что температура в створе дуги постоянна и не зависит от тока, в то время как мощность в створе дуги изменяется с током [3]. В результате была получена модель дуги в следующей форме:

$$\frac{\Theta}{g} \frac{dg}{dt} = \left(\frac{u}{u_0} \right)^2 - 1. \quad (7)$$

В параметрах U, I последнее уравнение можно записать как

$$\frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u} \frac{du_c}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left[\left(\frac{u}{u_0} \right)^2 - 1 \right], \quad (8)$$

где u_0 – напряжение на дуге в установившемся режиме.

В качестве исходного уравнения для адаптивного моделирования дуги на основе модели Новикова вводится уравнение вида

$$B_1 \frac{dg}{dt} + B_2 \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} + B_3 \frac{d(ui)}{dt} = ui - B_4 - gB_5, \quad (9)$$

где $B_1 = \Psi, B_2 = Q, B_3 = \alpha, B_4 = P, B_5 = K$ – параметры дуги.

При этом динамические свойства дуги определяются коэффициентами, а статическая вольт-амперная характеристика имеет следующий вид:

$$ui - P - gK, \quad (10)$$

где u, i, g – напряжение, ток, проводимость, а P, K – коэффициенты.

Выбор структуры подобного описания удовлетворяет следующим требованиям:

- широкий охват известных моделей дуги;
- удобство реализации;
- ограничение сложности модели.

В частности, эта модель при $\Psi = 0, \alpha = 0$ обобщает модель Майра, а при $Q = 0, \alpha = 0$ – модель Касси.

Приведем сравнение различных подходов, применяемых к анализу процессов дугообразования. В случае с системой зажигания, которая воспламеняет рабочую смесь в камере сгорания двигателя, теория Касси менее правдоподобна из-за того, что условия зажи-

гания рабочей смеси и нагрузка постоянно меняются (пуск, разгон, движение с постоянной скоростью при постоянной нагрузке и тому подобное). А так как давление в камере сгорания постоянно изменяется, то вследствие этого условия горения и отвода тепла от дуги будут переменными. Поэтому утверждение, что температура в створе дуги постоянна и не зависит от тока, практически необоснованно.

По многочисленным опытным данным, которые получены в самых различных условиях и для различных значений U и I , можно сказать, что теория Касси подтверждается при больших токах (сотни ампер), а теория Майра – при малых токах. Поэтому для систем зажигания, где токи в условиях горения дуги составляют 30–100 мА, модель Майра наиболее полно описывает дуговые процессы в свече зажигания. Но есть еще и другие модели. Например, модель Новикова, которая, как уже было указано, объединяет и модель Майра, и модель Касси. Ее также необходимо проверить на соответствие применительно к системам зажигания. В процессе проверки мы модернизируем выбранные модели для получения наилучшей сходимости с экспериментом [3].

Оптимизация выбранной математической модели дуги в свече зажигания (модель Майра) проведена по методу Рунге-Кутты в среде MathCAD, где дуга моделируется системой из пяти дифференциальных уравнений, которые были составлены на основе схемы замещения системы зажигания (рис. 1).

В данную схему входят:

- коммутатор, который получает сигналы с датчиков и коммутирует ток разрыва, протекающий по первичной обмотке катушки зажигания;
- катушка зажигания, моделируемая посредством эквивалентной схемы замещения;

- дуговой промежуток между электродами свечи зажигания;

- распределитель, сигнал на который поступает с выхода катушки зажигания. Он выполняет функцию распределения высоковольтных импульсов по проводам (в современном исполнении нет механических распределителей, распределение импульсов идет на индивидуальные катушки через электронный блок управления (ЭБУ));

- высоковольтные провода, рассматриваемые как проводниковый материал.

Исходя из представленной схемы замещения составляются пять дифференциальных уравнений по числу неизвестных величин, для которых необходимо получить их зависимости от времени ($i_1(t), U_{c1}(t), i_2(t), U_{c2}(t), i_5(t)$). Причем $i_1(t)$ – ток в первичной обмотке катушки зажигания, $U_{c1}(t)$ – напряжение на первичной обмотке катушки зажигания, $i_2(t)$ – ток во вторичной обмотке катушки зажигания, $U_{c2}(t)$ – напряжение на вторичной обмотке катушки зажигания, $i_5(t)$ – ток дуги. Первые четыре уравнения составляются на основе токов и напряжений первичной и вторичной обмоток катушки зажигания при работе на холостом ходу. Нагрузкой данной катушки зажигания является дуга в свече зажигания, уравнение тока которого является нелинейным и приводится в пятом уравнении [2].

Сама система дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= k_1(u'_{c1} + i_1 r'_1) + k_2(u_{c2} + i_2 r_2); \\ \frac{du'_{c1}}{dt} &= \frac{1}{c_1} i_1; \\ \frac{di_2}{dt} &= k_3(u'_{c1} + i_1 r'_1) + k_4(u_{c2} + i_2 r_2); \\ \frac{du_{c2}}{dt} &= \frac{1}{c_2} (i_2 - i_5); \\ \frac{di_5}{dt} &= \frac{(i_2 - i_5) \cdot i_5}{c_2 u'_{c2}} + \frac{1}{\Theta} \left(\frac{u_{c2} i_5^2}{[U_0 i_5] + P_0} - i_5 \right), \end{aligned} \quad (11)$$

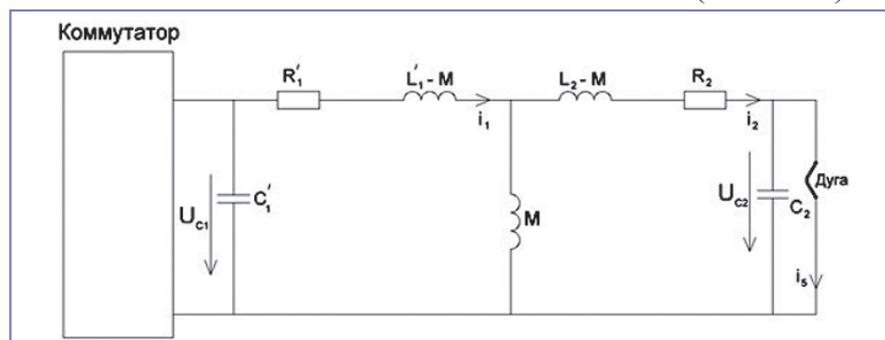


Рис. 1. Схема замещения С3.

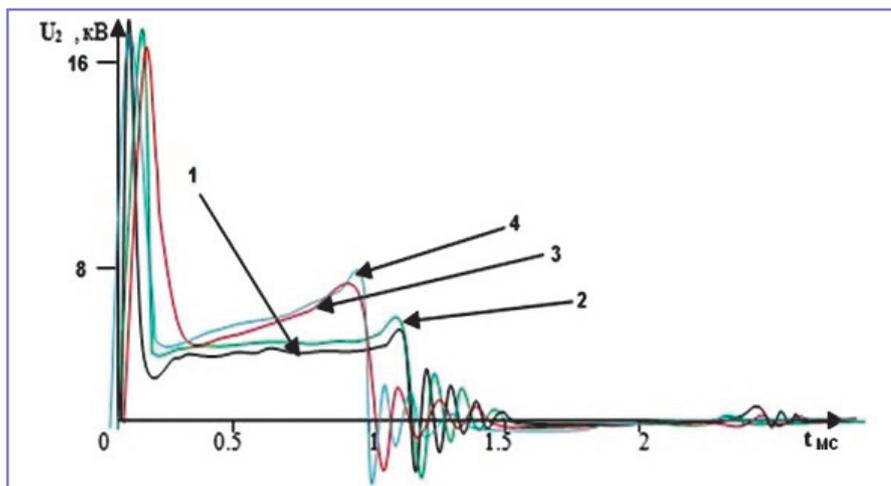


Рис. 2. Экспериментальная кривая временной характеристики напряжения на вторичной обмотке катушки зажигания (1), модель Майра (2), модель Касси (3) и модель Новикова (4).

где $k_1 = -0,5885$; $k_2 = -0,5859$; $k_3 = -0,586$; $k_4 = -0,626$ – коэффициенты; P_0 – мощность, выделяемая в дуге; θ – постоянная времени дуги, при этом начальные условия для данных токов и напряжений берутся из расчета 1% от номинальных значений.

Последнее, пятое, уравнение получено по модифицированной модели Майра путем преобразования формулы (6) относительно тока дуги $i_s(t)$. Аналогично в двух других случаях пятое уравнение заменяется уравнением, написанным по модели Касси или по обобщенной модели. При этом следует упомянуть, что полученные математические модели необходимо настроить под результаты эксперимента для получения наилучшей сходимости показанных математических моделей.

Настройка модели осуществляется изменением параметров дугового разряда C_1 ; C_2 ; P_0 ; U .

Экспериментальные исследования направлены на подтверждение достоверности математических моделей и получены при помощи многофункциональной платы АЦП L-783 с разрядностью 12 бит и тактовой частотой 3 МГц, установленной в компьютер. Исследования производились на стенде, моделирующем работу системы зажигания марки СПЗ-16, и на реальном автомобиле марки ВАЗ 11176. Плата имеет 16 каналов «Ввод/вывод», из которых в ходе эксперимента использовались только три. Пропускная способность установки, таким образом, была около 1 МГц на канал [5]. При этом были изучены следующие зависимости:

- зависимость напряжения на свече зажигания от времени ($U_{cb}(t)$);

- зависимость напряжения на вторичной обмотке катушки зажигания от времени ($U_{2m}(t)$);

- зависимость тока, проходящего через электроды свечи зажигания как функции времени ($I_{cb}(t)$).

В ходе исследования производились измерения трех вышеописанных величин с заданной частотой дискретизации. Ранее те же величины измерялись с помощью звуковой карты. Аналоговый сигнал при помощи звуковой карты представлялся в цифровом виде и записывался в файл. Обработка файла осуществлялась редактором Cool Edit, где его можно представить в виде графика или спектра. Результатом экспериментальных исследований явилось подтверждение с приемлемой для инженерных расчетов погрешностью разработанных математических моделей и экспериментальных данных, что иллюстрируется графиком, представленным на рис. 2.

Таким образом, детальный анализ кривых на рис. 2 можно обобщить следующим образом.

1. Анализ кривых, приведенных на рис. 2, показывает, что между кривыми, записанными при помощи АЦП и промоделированными в MathCAD, наблюдается практическое соответствие. Детальное их сравнение показывает близкое соответствие по параметру динамической погрешности при различных искажениях участка горения дуги и участка затухания.

2. На экспериментальной кривой эти участки более четко выражены по отношению к кривым, полученным по математическим моделям, описанным выше. Модель Майра наиболее близка

к экспериментальной кривой (динамическая погрешность – 5%), так как на ней участок горения дуги более стабилен, но при этом участок затухания выражен слабо (динамическая погрешность – 12%).

3. В модели Касси (кривая 3) и модели Новикова (кривая 4) участок горения дуги менее стабилен по отношению к экспериментальной кривой (динамическая погрешность – 20–25%), но модель Новикова дает наиболее приближенный к экспериментальному участку затухания (динамическая погрешность – 15%), который в модели Касси выражен менее точно (динамическая погрешность – 20%).

Полученные результаты работы создают практическую основу для исследований по улучшению системы зажигания (СЗ) в аспекте электромагнитной совместимости СЗ и электрооборудования внутри и вне автомобиля. Экспериментально достичь указанных целей сложно и не всегда возможно, так как вариантов взаимовлияний системы зажигания и других систем огромное множество, для этой цели здесь и производится математическое моделирование [4].

Литература

1. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. Л.: Энергия, 1978.
2. Петровский С.В. Исследование системы зажигания автомобилей при помощи платы АЦП L – 783. «Туполевские чтения XVII»: Материалы международной научно-технической конференции. – Казань, КГТУ-КАИ, 2009. – с. 105–107.
3. Петровский С.В. Математическое моделирование процессов дугообразования в системе зажигания автомобиля. // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». № 2 (24). Самара. СамГТУ, 2009.
4. Петровский С.В., Николаев П.А. Моделирование электромагнитных помех при работе системы зажигания автомобиля. // Научные труды V международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Том 1, Томск. ТПУ, 2014. С. 355–359.
5. Petrovski S., Bouchet F., Petrovski A. Data-driven Modelling of Electromagnetic Interferences in Motor Vehicles. // IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA 2013) Albena, Bulgaria, 2013. ISBN: 978–1–4799–0659–8. DOI: 10.1109/INISTA.2013.6577658. pp. 1–7.
6. Petrovski S., Rattadilok P., Petrovski A. Anomaly Monitoring Framework Based on Intelligent

Data Analysis. // In the Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning (IDEAL 2013), October 2013, Hefei, China. Springer Global, Lecture Notes in Computer Science, volume 8206, pp. 134–141. ISBN978–3–642–41277–6. DOI: 10.1007/978–3–642–41278–3_17.

7. Petrovski A., Rattadilok P., Petrovski S., Designing a context-aware cyber physical system for detecting security threats in motor vehicles. // SIN'15 Proceedings of the 8th International Conference on Security of Information and Networks, Sochi, Russia. 2015. pp. 267–270. ISBN978–1–4503–3453–2. DOI> 10.1145/2799979.2800029/

Петровский Сергей Валерьевич

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

Козловский Владимир Николаевич

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

Шевцов Владислав Александрович

Родился в 1993 году. Магистрант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» СамГТУ, г. Самара. Автор 1 работы.

Petrovskiy Sergey

Was born in 1976. In 1999 he graduated from SamGTU with specialization in «Branch-wise

electric supply». His work experience is 16 years. At present he works as leading engineer at the department «Electric power plant» of SamGTU. He has 38 articles and 1 patent.

Kozlovskiy Vladimir

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

Shevtsov Vladislav

Was born in 1993. He is a Master's degree student at the department «Theoretic and general electrotechnics» of SamGTU, Samara city. He is an author of 1 article.

Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов

// Battery-electric shunting locomotive with lithium-ion storage batteries //

Штанг А. А., к. т. н., Ярославцев М. В.
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск

В статье предложено использование контактно-аккумуляторных электровозов для выполнения маневровой работы на электрифицированных линиях железных дорог с учетом современного опыта применения накопителей электрической энергии на транспорте. Определены основные параметры тяговой энергетической установки локомотива, приведена ее функциональная схема. Выполнена оценка экономического эффекта экономии топлива, рассмотрены эксплуатационные преимущества и недостатки предложенного решения.

Ключевые слова: маневровый локомотив, контактно-аккумуляторный электровоз, литий-ионный аккумулятор, топливная экономичность, накопитель энергии.

В связи с повышением стоимости топлива и экологических требований к железнодорожному транспорту в настоящее время ведется активный поиск технических решений, повышающих энергетическую эффективность маневровых локомотивов, обладающих наименьшим эксплуатационным КПД по сравнению с локомотивами, занятыми в поездной работе [1]. Для решения этой проблемы созданы образцы локомотивов, использующих газовое топливо (ТЭМ19 [2]), обладающие двумя дизельными двигателями (ТЭМ14 [3]) либо гибридной энергоустановкой (ТЭМ9h [4]). За рубежом компанией Bombardier создан электровоз с дополнительной гибридной энергоустановкой пониженной мощности, предназначенной для выполнения маневровой работы [5].

Современные достижения в области преобразования и накопления электрической энергии позволяют предложить решения, допускающие отказ от применения двигателей внутреннего

Battery-electric locomotives with lithium-ion storage batteries are proposed for shunting duties on electrified railroad lines considering experience of energy storage devices applications. Main parameters of traction drive are calculated and its functional scheme is shown in the article. Advantages of battery-electric over diesel locomotives are discussed, estimated fuel economy is shown.

Keywords: shunting locomotive, battery-electric locomotive, lithium-ion battery, fuel economy, energy storage.

сгорания. На электрифицированных железных дорогах альтернативой применению маневровых тепловозов может являться использование контактно-аккумуляторных маневровых электровозов. Во время нахождения локомотива на электрифицированных путях питание двигателей и заряд тяговой батареи производятся от контактной сети. При выходе локомотива на неэлектрифицированный участок пути его передвижение осуществляется за счет использования тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ). Подобный принцип работы в настоящее время активно применяется на подвижном составе городского электротранспорта, в том числе на выпускаемых в России троллейбусах СТ-6217 и Тролза-5265 [6].

Основные параметры контактно-аккумуляторного локомотива

Наиболее распространенными сериями маневровых тепловозов являются ТЭМ2 и выпускаемые в настоящее время

ТЭМ18. Суммарная длительная мощность тяговых двигателей тепловоза ТЭМ18 составляет 620 кВт, а номинальное напряжение тягового генератора – 280 В [7].

Особенностью работы маневровых локомотивов является большая доля времени работы двигателя на холостом ходу, достигающая 70–75% и в отдельных случаях больших значений [8–12]. Только при вывозной работе доля холостого хода может в отдельных случаях снижаться до 37% при характерных значениях также свыше 70%. При этом, в случае вывозной работы, движение поезда осуществляется главным образом по электрифицированным перегонкам, а в случае маневровой работы на станциях регулярно происходит выход локомотива на электрифицированные приемо-отправочные пути.

Для дальнейшего расчета принято, что в течение смены маневровый локомотив работает автономно не более 5 часов (62,5% времени), в том числе под нагрузкой с максимальным потреблением мощности тяговыми двигателями в течение не более 2 ч (40%), а в режиме холостого хода без заряда ТАБ – не менее 3 ч (60%). В этом случае потребление энергии тяговыми двигателями составляет 4,5 ГДж. При мощности собственных нужд, равной 10% мощности тяговых двигателей, и КПД преобразования энергии ТАБ, равном 80%, определена необходимая энергоемкость батареи $E_{ТАБ}$:

$$E_{ТАБ} = \frac{P_{ТЭД} \cdot t_{ТЭД} + 0,1P_{ТЭД} \cdot t_{АР}}{\eta} = \frac{620 \cdot 7200 + 0,1 \cdot 620 \cdot 18000}{0,8} = 7,0 \text{ ГДж},$$

где $P_{ТЭД}$ – суммарная мощность тяговых двигателей, кВт;

$t_{ТЭД}$ – время автономной работы локомотива в режиме тяги, с;

$t_{АР}$ – общее время автономной работы локомотива;

η – КПД преобразования энергии.

Таблица 1. Технические характеристики литий-полимерного аккумулятора WB-LYP400AHА производства Winston Batteries и аккумулятора LT-LYP380 производства ООО «Лиотех».

Тип элемента	WB-LYP400AHА	LT-LYP380
Энергоемкость, А*ч	400	380
Номинальное напряжение заряда/разряда, В	2,8 / 4,0	3,2 / 3,9
Допустимый длительный ток заряда и разряда	3С = 1200 А	3С = 1140 А
Габаритные размеры, мм	460 x 65 x 285	163 x 167 x 337
Вес, кг	13,5	14,8
Количество циклов заряда-разряда	5000 при глубине разряда 80% 7000 при глубине разряда 70%	3000 при глубине разряда 80%

Для определения параметров накопителя энергии приняты элементы WB-LYP400AHА и LT-LYP380, выпускаемые предприятиями Winston Batteries в Китае и «Лиотех» в России [13, 14]. Их технические характеристики приведены в таблице 1.

Таким образом, для достижения необходимой мощности батарея аккумуляторов WB-LYP400AHА должна иметь количество элементов N_p не менее

$$N_p = \frac{P_{ТЭД} + 0,1P_{ТЭД}}{U_{эл} \cdot I_{эл} \cdot \eta} = \frac{620 + 0,1 \cdot 620}{2,8 \cdot 1,2 \cdot 0,8} = 254,$$

где $U_{эл}$ – номинальное напряжение элемента;

$I_{эл}$ – номинальный ток элемента.

Для достижения необходимой емкости батарея должна иметь не менее

$$N_E = \frac{E_{ТАБ}}{3600 \cdot C \cdot U_{эл}} = \frac{7 \cdot 10^9}{3600 \cdot 400 \cdot 2,8} = 1736,$$

где C – емкость элемента, А·ч.

Поскольку общее число элементов, по условию емкости, в несколько раз превосходит число элементов батареи, необходимое для обеспечения заданной мощности, тяговый ток делится между несколькими параллельными ветвями. В результате снижается нагрузка на отдельные элементы и увеличивается их срок службы, появляется возможность отключения одной из параллельных ветвей тяговой батареи в случае неисправности одного из ее элементов. Кроме того, возникает возможность применения на локомотиве тяговых двигателей повышенной мощности.

Тяговые литий-ионные батареи должны оснащаться системой вырав-

нивания напряжения их элементов. Несмотря на высокий паспортный диапазон рабочих температур элементов тяговых батарей, опыт их эксплуатации на троллейбусах СТ-6217 показал необходимость мероприятий по термостатированию. В зимнее время необходимы утепление и подогрев отсеков хранения батарей, а в летнее время – их принудительная вентиляция.

С учетом сказанного, общий вес накопителей с учетом стеллажей и выравнивающего заряд отдельных элементов оборудования может быть оценен как в 1,5 раза превосходящий вес отдельных элементов, а объем, с учетом пространства для отбегания элементов охлаждающим воздухом, – в 2 раза. Таким образом, общий вес блока накопителей может быть оценен в 35 т, а его объем – 30 м³.

При размещении накопителей на экипажной части тепловоза ТЭМ18 следует учесть возможность отказа от ряда оборудования, связанного с дизель-генераторной установкой. Вес отдельных узлов тепловоза приведен в таблице 2. Объем капотов тепловоза составляет около 45–50 м³, что, с учетом возможности повышения осевой нагрузки локомотива, составляющей 21 т, делает возможным размещение накопителей и преобразователя напряжения в существующем кузове. На рис. 1 показана функциональная блок-схема локомотива. Электровазы постоянного и переменного токов различаются устрой-

Таблица 2. Вес отдельных узлов тепловоза ТЭМ18.

Наименование агрегата	Масса, т
Дизель-генератор	14,6
Аккумуляторная батарея	2,24
Охлаждающие секции холодильника	1,1
Запасы топлива, воды, масла	6,54
Итого	24,5

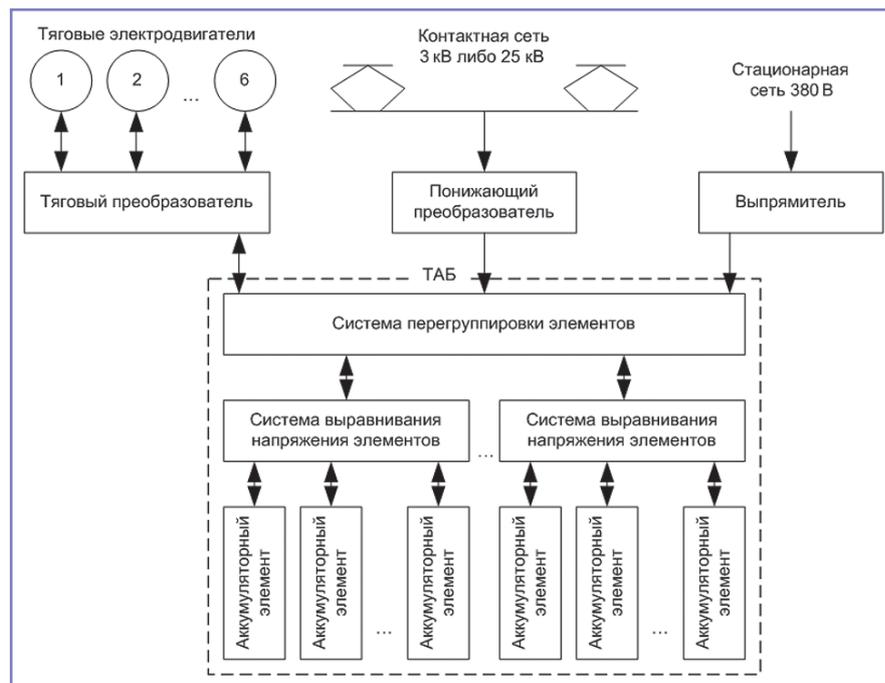


Рис. 1. Функциональная блок-схема контактно-аккумуляторного маневрового электроваза. Стрелками показаны возможные направления потоков энергии.

ством преобразователя, понижающего напряжение контактной сети.

Оценка эффективности проекта

Основным эффектом перехода является сокращение стоимости энергоносителей, поскольку электрическая энергия значительно дешевле энергии дизельного топлива. Замена тепловоза контактно-аккумуляторным электровозом позволит исключить расход топлива на работу двигателя на холостом ходу. Расход энергии локомотивом при выезде, торможении и стоянке будет определяться потреблением энергии вспомогательным оборудованием и системой термостатирования тяговой батареи.

Перегруппировка тяговых батарей позволяет снизить напряжение их заряда и осуществлять заряд тормозным током тяговых двигателей, что является дополнительным способом сокращения расхода энергии. Возможна установка на локомотив выпрямителя и заряд его ТАБ от промышленной сети в условиях депо.

Отказ от дизель-генераторной установки значительно сокращает трудоемкость технического обслуживания локомотива, исключает потребность в устройствах для его экипировки водой, двигательным маслом и дизельным топливом. Элементы литий-ионных батарей являются необслуживаемыми, а устанавливаемая на аккумуляторные сборки система выравнивания напряжения способна автоматически сигнализировать о недопустимом снижении энергоемкости элементов.

Поскольку ТАБ комплектуется из отдельных элементов, обеспечивается свобода компоновки локомотива, позволяющая расположить оборудование наиболее рационально, исходя из критериев удобства его монтажа, эксплуатации и равномерного распределения нагрузки по осям. Возможность обеспечить круговой обзор из кабины при изменении формы капотов локомотива, отсутствие шума и вибраций, создаваемых дизельным двигателем, облегчают условия работы машиниста.

У существующих маневровых тепловозов ограничение силы тяги по длительному току двигателей значительно ниже ограничения по сцеплению (для ТЭМ18–21 и 27 тс при скорости 10,5 км/ч), а скорость выхода на характеристику максимальной мощности низка (10,5 км/ч). Отказ от применения дизель-генераторной установки в ка-

честве источника энергии создает возможность повышения мощности локомотива, а следовательно, и веса поезда при выполнении вывозной работы. Поскольку параметры ТАБ определяются в первую очередь ее энергоемкостью, повышение мощности может быть достигнуто также и в автономном режиме работы локомотива при условии сокращения времени автономной работы. Повышение веса либо скорости движения поездов может сократить потребность в локомотивах, позволит отказаться от эксплуатации тепловозов по СМЕ, а также несколько повысит пропускную способность.

Ниже приведена оценка экономического эффекта замены тепловоза контактно-аккумуляторным электровозом по потреблению энергии. Полный расход энергии электровозом в автономном режиме составляет 7,0 ГДж, а с учетом КПД заряда ТАБ 0,8 он увеличится до 8,75 ГДж. В предположении, что доля времени работы под тягой в неавтономном режиме (при питании от контактной сети) также составляет 40%, расход энергии в этом режиме составит 4,2 ГДж. С учетом КПД системы электроснабжения, принятого 0,85, потребление энергии локомотивом из энергосистемы за смену продолжительностью 8 часов составит 15,3 ГДж, или 4250 кВт·ч.

Для работающего в аналогичном режиме тепловоза потери на передачу и накопление энергии отсутствуют. Таким образом, дизель-генераторная установка должна выработать 11,2 ГДж энергии, что при удельном расходе топлива 210 г/кВт·ч потребует 653 кг дизельного топлива.

Пусть стоимость электрической энергии составляет 3 руб./кВт·ч, а дизельного топлива – 35 руб./кг. В этом случае при 3-сменной работе локомотива и среднегодовом коэффициенте его использования, равном 0,7, разность стоимости электрической энергии и дизельного топлива для выполнения одинакового объема работы составит 7,75 млн руб. в год. Стоимость элементов ТАБ, по данным [13], составляет около 50 млн руб. Таким образом, для окупаемости проекта в расчетных условиях необходимо, чтобы срок службы ТАБ составлял не менее 7–10 лет.

Важно отметить, что при режиме работы локомотива, не связанном с регулярным глубоким разрядом ТАБ, эффективность его применения будет суще-

ственно возрастать как за счет повышения срока службы батареи, так и за счет уменьшения потерь запасаемой энергии на ее внутреннем сопротивлении. Как следует из приведенных исследований, в большинстве случаев фактическое время работы значительно меньше расчетных 40%. Так, в предположении, что локомотив работает с номинальной мощностью 20% времени и не потребляет энергию на тягу в течение остальных 80%, разница стоимости энергоносителей сократится лишь на 20%.

Важнейшим фактором, определяющим затраты на техническое обслуживание и эффективность применения накопителей, является их срок службы, определяемый числом циклов заряда-разряда. Производителем заявлен срок службы 5000 циклов при глубине разряда 80% и 7000 циклов при глубине разряда 70%, причем срок службы батареи значительно возрастает с дальнейшим уменьшением глубины ее разряда.

При коэффициенте использования локомотива 0,7 и 3-сменной работе при однократном глубоком разряде ТАБ в течение смены потребуются выполнить 770 циклов заряда-разряда в год. Таким образом, срок службы ТАБ составит 6,5–9 лет при регулярном ее разряде на глубину 70–80%. В случае же режима работы с частым нахождением на электрифицированных путях возможно значительное повышение допустимого числа циклов заряда-разряда с увеличением срока эксплуатации батареи. С целью достижения равномерного износа тяговых батарей возможен ежегодный обмен локомотивов либо сборок батарей при прохождении плановых ремонтов.

Одним из путей сокращения стоимости транспортного средства является сокращение емкости ТАБ за счет снижения времени автономной работы [15–17]. Так, для тепловоза ТЭМ9н гарантируется автономная работа от аккумуляторной батареи в течение 1 часа, что достаточно для решения большинства задач, кроме ведения вывозных поездов по неэлектрифицированным участкам и работы на подъездных путях большой протяженности. В то же время такое решение увеличивает глубину разряда ТАБ и, в зависимости от условий эксплуатации локомотива, может существенно сократить срок ее службы. По указанным причинам значительное сокращение энергоемкости ТАБ локомотива представляется нецелесообразным.

Выводы

В настоящее время является технически возможным создание контактно-аккумуляторных маневровых электро-возов с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов. Имеется опыт эксплуатации накопительных систем на транспорте, значительная часть необходимого оборудования, включая элементы тяговых батарей и системы управления ими, производятся в России.

Основными недостатками предлагаемой схемы локомотива являются некоторое ограничение области его эксплуатации по возможности осуществления заряда тяговой батареи и высокая первоначальная стоимость при сравнимой с тепловозом стоимости жизненного цикла локомотива.

В ближайшие годы по мере развития транспорта и увеличения объемов выпуска аккумуляторов можно ожидать снижения их стоимости. Прогнозируемое сокращение удельной стоимости накопителей энергии в 1,5 раза до уровня 250 долл./кВт·ч [18–20] сделает стоимость жизненного цикла контактно-аккумуляторного маневрового электровоза, выполненного по предложенной схеме, ниже, чем у тепловоза на дизельном топливе при большинстве режимов эксплуатации. Ожидаемое в более длительной перспективе снижение удельной стоимости литий-ионных элементов до 150 долл./кВт·ч позволит им конкурировать с локомотивами на газовом топливе.

Литература

1. Балабин В.Н., Евпаков В.В. Производство маневровых и промышленных локомотивов: проблемы развития отрасли // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 6. – С. 30–33.
2. Маневровый тепловоз ТЭМ19 [Электронн. ресурс]. – URL: <http://www.ukbmz.ru/production/manevrovyye-teplovozy/584/>
3. Тепловоз ТЭМ14 [Электронн. ресурс]. – URL: <http://www.sinara-group.com/image/ltz/TEM14.pdf>
4. Тепловоз ТЭМ9h [Электронн. ресурс]. – URL: <http://sinara-group.com/image/ltz/TEM9H.pdf>
5. TRAXX AC Last Mile [Электронн. ресурс]. – URL: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/locomotives/traxx.html>
6. Троллейбус с увеличенным автономным ходом [Электронн. ресурс]. – URL: <http://www.liotech.ru/trolley>
7. Тепловоз ТЭМ18ДМ: руководство по эксплуатации // Брянск: ЗАО УК «БМЗ», 2009.
8. Назаров Л.С. Маневровые тепловозы // М.: изд-во «Транспорт», 1977.
9. Молчанов А.И., Поварков И.Л., Мугинштейн Л.А., Попов К.М. Автоматизированная система учета, контроля и анализа расхода топлива маневровыми тепловозами // Вестник ВНИИЖТ. – 2004. – № 2. – С. 24–27.
10. Никитина Е.А. Тепловозные дизели типа Д49 // М.: изд-во «Транспорт», 1982.
11. Щуров Н.И., Гурова Е.А., Макаров С.В., Стрельникова Д.М. Анализ режимов работы силовых установок маневровых локомотивов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 104.
12. Донской А.Л., Холяпин М.В., Назаров И.В., Молчанов А.И., Поварков И.Л., Попов К.М. Регистратор параметров работы тепловоза // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 9.
13. WB-LYP400AHA: Thunder Sky Winston Energy Group Ltd [Электронн. ресурс]. – URL: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp400aha?category_id=176
14. Литий-ионные аккумуляторы: продукция и цены [Электронн. ресурс]. – URL: <http://www.liotech.ru/newsection7159>
15. Ярославцев М.В. Выбор основных параметров тягового привода гибридного транспортного средства // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ-2014): сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 290–293.
16. Мятаж А.В., Ярославцев М.В. Определенные энергоемкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4 (47). – С. 62–65.
17. Щуров Н.И., Ярославцев М.В. Эффективное использование энергии буферного накопителя гибридного транспортного средства // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. 5 междунар. науч. – практ. конф., Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 2. – С. 312–315.
18. Electric vehicle batteries are getting cheaper much faster than we expected [Электронн. ресурс]. – URL: <http://arstechnica.com/science/2015/07/electric-vehicle-batteries-are-getting-cheaper-much-faster-than-we-expected/>
19. Transitions to Alternative Vehicles and Fuels // Washington: The National Academies Press, 2013.
20. Nykvist B., Nilsson M. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles // Nature Climate Change. – 2015. – № 5. – P. 329–332. – doi:10.1038/nclimate2564

Штанг Александр Александрович

Родился в 1978 году. В 2001 году окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Электрический транспорт». Кандидат технических наук. В 2006 году защитил диссертацию по теме «Повышение эффективности электро-транспортных систем на основе использования накопителей энергии». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры электротехнических комплексов факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Имеет 40 научных публикаций.

Ярославцев Михаил Викторович

Родился в 1987 году. В 2010 году окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Электротехника, электромеханика, электротехнологии». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время работает ассистентом кафедры электротехнических комплексов факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Имеет 20 научных публикаций.

Shtang Aleksandr

Was born in 1978. In 2001 he graduated from Novosibirsk State Technical University with degree in the «Electric transport». He is a Doctor of the Technical Sciences. In 2006 he defended a dissertation «The Improvement of the efficiency of the electric transport systems based on the use of energy storage». He has 13 years of works experience. At the present he works as assistant professor at the Electro technical complex department of the Mechatronics and automatization faculty of the Novosibirsk State Technical University. He has 40 academic papers.

Yaroslavtsev Michael

Was born in 1987. In 2010 he graduated from Novosibirsk State Technical University with degree in the «Electrical engineering, electro mechanics and electrotechnologies». He has 7 years of work experience. At the present time he works as assistant professor at the Electro technical complex department of the Mechatronics and automatization faculty of Novosibirsk State Technical University. He has 20 academic papers.

Оценка гармонических составляющих тягового тока в системе электроснабжения метрополитена при работе 12-пульсовых выпрямительных агрегатов

// Estimation of the harmonic components of traction current in the metro power supply system of underground while working of 12-pulse rectifier units //

**Бадёр М.П., д.т.н., профессор,
Гречишников В.А., д.т.н., доцент,
Шевлюгин М.В., д.т.н., доцент,
Данг Вьет Фук,
МГУПС (МИИТ), г. Москва**

В статье представлены результаты имитационного моделирования работы системы тягового электроснабжения метрополитена с 6- и 12-пульсовыми выпрямителями, а также с ЭПС типа 81–740/741 с асинхронными двигателями. Модель разработана в программной среде Matlab/Simulink. Цель разработанной модели – исследование гармонических составляющих тягового тока, которые оказывают мешающее воздействие на работу систем обеспечения движения поездов СЦБ, АРС и АЛС, при совместном влиянии схем преобразователей ЭПС и пульсаций выпрямительных агрегатов тяговых подстанций. Получены зависимости токов высших гармоник несущих частот в функции времени при различных схемах выпрямления, проведены статистическая обработка полученных результатов и сравнение с данными экспериментальных замеров.

Ключевые слова: тяговый привод с асинхронными двигателями, 12-пульсовая схема выпрямления, система тягового электроснабжения метрополитена, гармонические составляющие тягового тока, мешающие влияния на системы СЦБ, АРС и АЛС.

Развитие транспортной инфраструктуры и пассажиропотока в метрополитене требует надежного электроснабжения, повышения качества электроэнергии и обеспечения безопасности движения поездов. Проведенные теоретические исследования показали, что переход от 6-пульсовых схем выпрямления на тяговых подстанциях (ТП) Московского метрополитена, использующихся с 1961 года, к 12-пульсовым с параллельным соединением двух трехфазных мостов позволяет

The article presents simulation results of the operation of the metro traction power supply system with the 6-pulse and 12-pulse rectifiers, and the electrical rolling stock type 81–740/741 with induction motors. The model is worked out in software environment Matlab/Simulink. The aim of designed model is to study the harmonic components of traction current, which have a disturbing influence on the operation of the propulsion system of train – the signaling system and automatic train signaling with Automatic speed regulation system, at the joint influence of the converter of the electrical rolling stock and the pulse of the rectifier units of traction substations. Dependencies of higher harmonic currents of carrier frequencies in function of time at various rectification circuits were obtained, the statistical processing of the received results and comparison with the data of experimental measurements were conducted.

Keywords: traction drive with induction motors, traction power supply system of underground, 12-pulse rectification circuits, 12-pulse uncontrolled bridge rectifiers, harmonic components of traction current, disturbing influences on the signaling system, automatic train signaling with Automatic speed regulation system.

значительно улучшить технико-экономические показатели тяговых агрегатов, повысить качество выпрямленного напряжения, улучшить электромагнитную совместимость электроснабжения метрополитена с устройствами СЦБ и АРС-АРС [1, 2, 14, 15].

Электроподвижной состав (ЭПС) является основным потребителем электроэнергии в системе тягового электроснабжения (СТЭ) метрополитена. Тяговый ток, протекая по цепям электропи-

тания двигателей ЭПС, искажается как за счет его нелинейных элементов – преобразователя и асинхронных тяговых двигателей, так и за счет пульсаций выпрямителей ТП, что обуславливает возникновение помех различных частот. В режиме тяги ЭПС с асинхронными двигателями в спектре тягового тока появляются низкочастотная и высокочастотная составляющие, а также комбинационная частота [10]. Низкочастотная определяется частотой выпрямительного агрегата ТП. Высокочастотная определяется частотой широтно-импульсного регулирования амплитуды напряжения преобразователя ЭПС, а также зависит от кратности модулирующей частоты и частоты ШИМ.

Наличие входных и выходных преобразовательных агрегатов, работающих в общем случае несинхронно, приводит к появлению в спектре тягового тока также комбинационных гармоник, частоты которых зависят от режимов работы преобразователей и меняются в весьма широком диапазоне. Аналитический расчет столь широкого спектра комбинационных гармоник сложен. Однако такой расчет необходим, так как частота тока помехи при совпадении с частотой сигнала тока может привести к ложному срабатыванию систем СЦБ, АРС-АЛС. Однако действующие амплитуды гармонических помех зависят от большого числа параметров, а именно: типа входного фильтра, инвертора напряжения и тяговых двигателей ЭПС, тяговой сети (индуктивная составляющая, тоннельные электротехнические устройства, протяженность тяговой сети между ЭПС и ТП), типа выпрямительных агрегатов ТП, особенностей конструкций тоннеля и пр.

Для оценки качества электрической энергии и исследования гармонических составляющих тягового тока был выбран участок СТЭ метрополитена с двухсторонним питанием и использованием 12-пульсовых выпрямительных агрега-

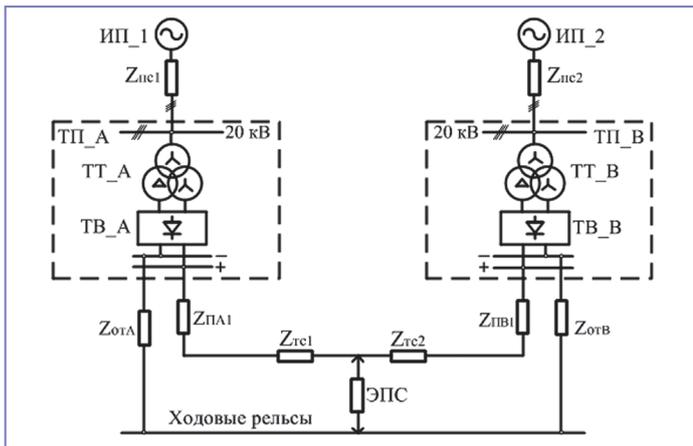


Рис. 1. Принципиальная схема СТЭ метрополитена с 12-пульсовыми преобразовательными агрегатами на ТП: ИП_1, ИП_2 – источники питания первичной системы каждой из двух ТП с внутренними сопротивлениями $Z_{лс1}$ и $Z_{лс2}$ напряжением 20 кВ; ТП_A и ТП_B – тяговые подстанции А и В; ТТ_A, ТТ_B – тяговые трансформаторы в ТП А и В; ТВ_A, ТВ_B – 12-пульсовые выпрямители в ТП А и В; $Z_{па1}$ и $Z_{пв1}$ – питающие кабельные линии от ТП А и В; $Z_{отв}$ и $Z_{отв}$ – отсасывающие кабельные линии в ТП А и В; $Z_{тс1}$ и $Z_{тс2}$ – участки тяговой сети; ЭПС – электropодвижной состав с асинхронными двигателями.

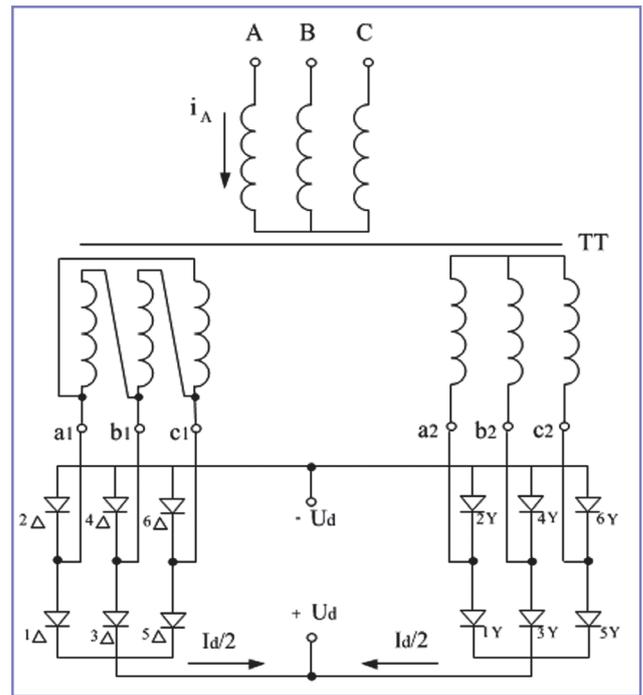


Рис. 2. Схема 12-пульсового выпрямителя с параллельным соединением мостов без уравнивающего реактора.

тов на ТП. Схема расчетного участка СТЭ представлена на рис. 1.

В качестве примера расчета рассматривается типовой участок фидерной зоны, параметры которого приведены в таблице 1.

Схема 12-пульсового выпрямителя, выполненная по параллельной схеме без уравнивающего реактора, изображена на рис. 2. В этой схеме питание двух параллельно соединенных со стороны выпрямленного тока трехфазных мостовых схем осуществляется от двух вентильных обмоток трехобмоточного тягового трансформатора. Вентильные обмотки имеют различные соединения: одна – с выводами a_1, b_1, c_1 по схеме «Треугольник», другая – с выводами a_2, b_2, c_2 по схеме «Звезда». Различием в соединении вентильных обмоток достигается сдвиг линейных напряжений вентильных обмоток на 30° .

По схеме расчетного участка, представленной на рис. 1, в среде Matlab/Simulink была разработана имитационная модель СТЭ метрополитена с использованием 6 и 12-пульсовых преобразовательных агрегатов на ТП для последующего сравнения полученных результатов при прочих равных условиях. В модели предусмотрены все элементы расчетного участка: два источника питания внешней сети с подводными линиями 10 (20) кВ; две ТП с 6 (12)-пульсовыми выпрямителями; питающие линии и линии обратного тока; участки тяговой сети с распределенными параметрами; ЭПС, а также система мониторинга и измерений показателей работы СТЭ для изучения высших гармонических составляющих тягового тока [3, 4].

Все технические характеристики выпрямителя типа В-МПЕ-Д-1,6к-825 УХЛ 4

соответствуют типовым устройствам, которые применяются на Московском метрополитене [5]. Модель каждого 12-пульсового выпрямителя, присоединенного к тяговому трансформатору, выполнена в виде двух параллельно соединенных блоков трехфазных диодных мостовых выпрямителей Universal Bride на элементах Diode типа Д163–2500 с сопротивлением диода в открытом состоянии $R_{он} = 0,097 \cdot 10^{-3}$ Ом и пороговым напряжением $V_f = 0,85$ В. Выходные порты каждого тягового агрегата $+U_d$ и $-U_d$ подключаются к общим шинам ТП, к которым, в свою очередь, присоединяются питающие и отсасывающие линии тяговой сети.

В общей имитационной модели подмодель ЭПС, в данном случае, состоит из 4 вагонов моделей 81–740/741, каждый из которых имеет тяговой привод с асинхронными двигателями. В схему силовой цепи комплекта электрооборудования тягового привода каждого вагона входит LC-фильтр, автономный инвертор напряжения на IGBT-модулях с блоком PWM Generator для управления инвертором с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией, четыре параллельно включенных тяговых асинхронных двигателя типа ДАТЭ-170–4У2 с номинальной мощностью по 170 кВт каждый. Автономный инвертор с помощью ШИМ преобразует напряжение постоянного тока, снимаемое с контактного рельса, в 3-фазную регулируемую

Таблица 1. Параметры элементов СТЭ метрополитена с 12-пульсовыми преобразовательными агрегатами.

Первичная питающая сеть	$U_{лс} = 20$ кВ
Тяговый агрегат	Тяговый трехфазный трехобмоточный трансформатор типа ТРСЗП 1600/20 МУЗ мощностью 1430 кВА и 12-пульсовый выпрямитель по параллельной схеме без уравнивающего реактора типа В-МПЕ-Д-1,6к-825 УХЛ4
Схема питания тяговой сети	Двухстороннее питание
Контактный рельс	Тип по ТУ 14-2-82-73
Ходовой рельс	Р65
ЭПС	Поезд с вагонами типа 81-740/741
Длина фидерной зоны питания	2 км
Координата ЭПС	300 м от второй тяговой подстанции ТП_B

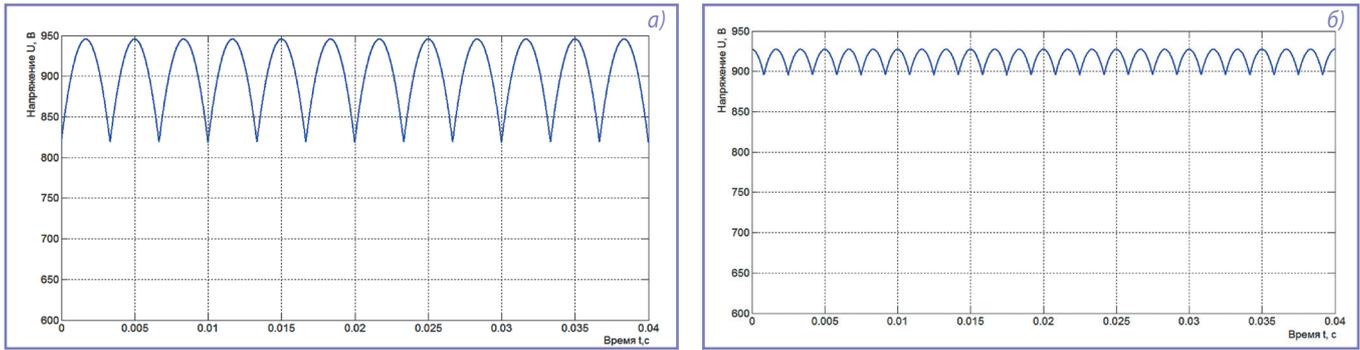


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на шинах ТП при имитационном моделировании:
а) 6-пульсовая схема выпрямления; б) 12-пульсовая схема выпрямления.

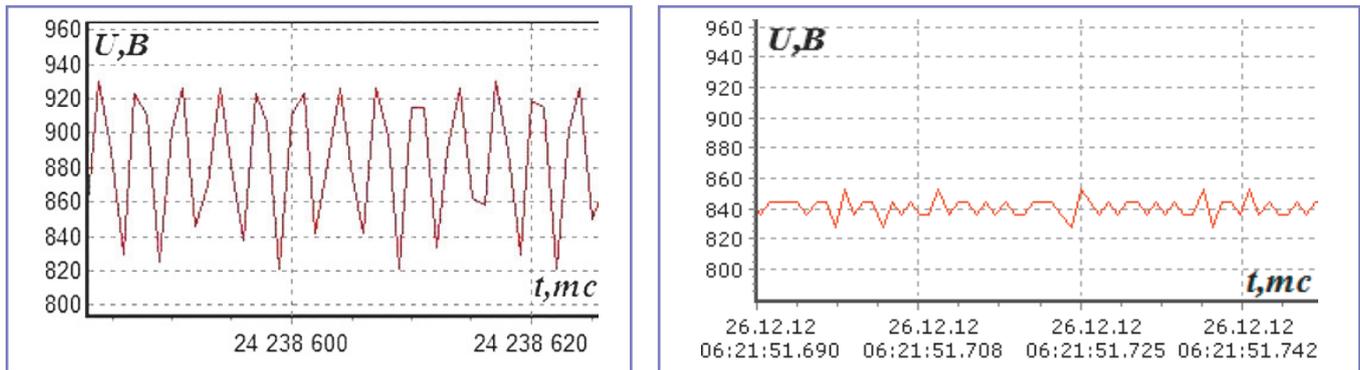


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на шинах ТП при экспериментальных замерах:
а) 6-пульсовая схема выпрямления; б) 12-пульсовая схема выпрямления.

систему напряжений для питания 4 тяговых асинхронных двигателей. Частота коммутаций ШИМ инвертора в режиме тяги ЭПС составляет 2400 Гц [3, 6].

Моделирование работы СТЭ метрополитена с 6 (12)-пульсовыми выпрямительными агрегатами в среде Matlab/Simulink производилось методом ode23tb во временной области модельного времени на интервале 4–5 с, с шагом не более 10^{-5} с, в режиме разгона до заданных уровней скоростей поезда – 10, 20, 30, 40, 50, 60 км/ч. В данном случае принято допущение, что на рассматриваемом интервале процесс разгона заканчивается, и оценка тягового тока происходит на стадии, когда ЭПС движется с установившейся скоростью. В модели с помощью систем измерения и мониторинга фиксируются осциллограммы напряжения на шинах ТП и тока ЭПС.

В последнее время все большее распространение получают цифровые измерительные средства, которые позволяют с высокой точностью и частотой производить замеры электрических параметров работы устройств тягового электроснабжения [7, 8] с последующим детальным статистическим анализом. Формы полученных при моделировании осциллограмм сравнивались с результатами экспериментальных замеров на ТП [9, 10]. На рис. 3 представлены осциллограммы напряжений при моделировании работы 6-пульсовых (рис. 3а) и 12-пульсовых (рис. 3б) выпрямителей. На рис. 4 представлены аналогичные фрагменты осциллограмм, полученные при экспериментальных замерах. Теоретические и экспериментальные данные демонстрируют хорошую сходимость (по периодам и амплитудам периодической составляющей

напряжения на шинах ТП). Следует отметить, что форма напряжения при эксперименте носит несколько ломаный характер. Это связано с шагом временной дискретизации измерительного прибора, который составляет 1 мс.

Система мониторинга и измерений позволила определить гармонические составляющие тягового тока в полосе исследуемых частот с помощью преобразования Фурье [11]. Пример мгновенных значений токов на частотах работы систем СЦБ и АЛС-АРС в функции времени представлен на рис. 5.

Результаты моделирования обрабатывались при помощи программы, разработанной в среде Delphi. При анализе ток каждой гармоники из полосы исследуемых частот оценивается на максимальное значение действующей величины в скользящем окне времени 0,2 с.



Рис. 5. Гармонические составляющие тока ЭПС в функции времени по результатам моделирования.



Рис. 6. Столбчатая диаграмма максимальных величин действующих значений гармоник тягового тока ЭПС на несущих частотах в процентном соотношении к нормируемым уровням по результатам моделирования работы ТП с 12-пульсовой схемой выпрямления.

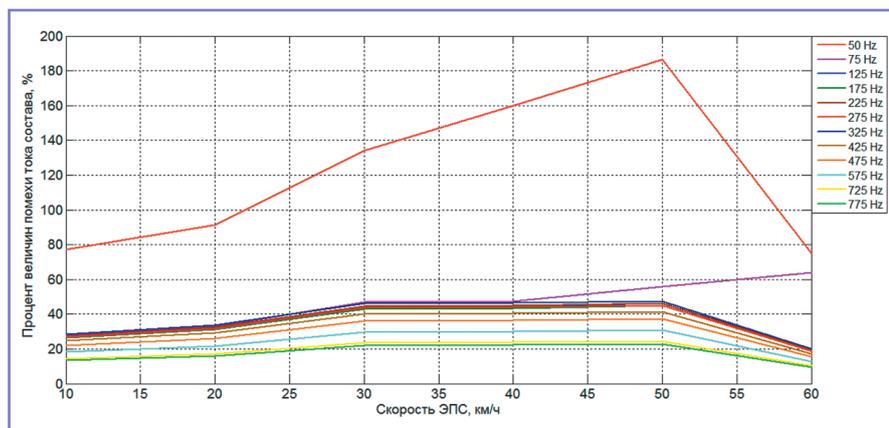


Рис. 7. Максимальные величины действующих значений гармоник тягового тока на несущих частотах в процентном соотношении к нормируемым уровням в зависимости от скорости ЭПС.

Полученные максимумы для каждой скорости движения ЭПС были отнесены к нормируемым значениям, согласно методике [12], и оценивались в процентном соотношении. Пример подобного анализа для скорости ЭПС 50 км/ч изображен на рис. 6.

Итоговые кривые процентного соотношения токов во всей полосе частот на множестве скоростей движения ЭПС от 10 до 60 км/ч в положении 0,3 км от

тяговой подстанции ТП_В при использовании 12-пульсовых схем выпрямления представлены на рис. 7.

Подобные имитационные исследования были проведены и для варианта расположения на ТП тяговых агрегатов с 6-пульсовыми схемами выпрямления. На рис. 8 представлена сравнительная диаграмма максимальных величин действующих значений гармоник тягового тока ЭПС на несущих частотах в про-

центном соотношении к нормируемым уровням по результатам моделирования с 6- и 12-пульсовыми схемами выпрямления. По обобщенным результатам моделирования можно сделать вывод, что использование 12-пульсовых схем выпрямления снижает уровень мешающих влияний на системы обеспечения безопасности поездов в среднем на 17%.

Полученные теоретическим путем данные по спектру гармонического составляющих тягового тока в СТЭ проверялись на адекватность с помощью данных экспериментальных замеров. Для оценки гармонического состава тягового тока замеры проводились на Филевской, Замоскворецкой и Люблинской линиях Московского метрополитена [9, 13]. Теоретические данные имитационного моделирования показали хорошую сходимость с замеренными токами гармоник в полосе исследуемых несущих частот систем СЦБ и АЛС-АРС.

Литература

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями [Текст]:



Рис. 8. Столбчатая диаграмма максимальных величин действующих значений гармоник тягового тока ЭПС на несущих частотах в процентном соотношении к нормируемым уровням по результатам моделирования с 6- и 12-пульсовыми схемами выпрямления.

диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук / Бадер Михаил Петрович. – М.: МИИТ, 1999. – 495 с.

2. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б.С. Барковский [и др.]; под ред. М.Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.

3. Шевлюгин М.В. Гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения метрополитена [Текст] / М.В. Шевлюгин, В.Ф. Данг // Мир транспорта. – 2015. № 6. – С. 28–39.

4. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.01): учебное пособие / В.Б. Терёхин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

5. Выпрямитель В-МПЕ-Д-1,6к-825 УХЛ 4. Руководство по эксплуатации.

6. Данг В.Ф. Модель вагона метрополитена для исследования гармонического состава тягового тока. [Текст] / В.Ф. Данг // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 5–6. – С. 24–27.

7. Бадёр М.П., Гречишников В.А., Шевлюгин М.В., Король Ю.Н. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга тяговых подстанций в режиме реального времени. Электроника и электрооборудование транспорта. 2011. № 5–6. С. 5–8.

8. Баранов Л.А., Бродский Ю.А., Гречишников В.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Оценка эффективности использования стационарных ёмкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения. Электротехника. 2010. № 1. С. 62–65.

9. Внедрение систем, обеспечивающих полезное использование тормозной энергии ЭПС на Московском метрополитене [Текст]: отчет о НИР; рук. НИР Баранов Л.А.; исполнители: Л.А. Баранов, В.Г. Гречишников, М.В. Шевлюгин и др.; МИИТ. 2009. 397 с.

10. Гаев Д.В. Внедрение энергосберегающих технологий [Текст] / Д.В. Гаев, А.В. Ершов, Л.А. Баранов, В.А. Гречишников, М.В. Шевлюгин // Мир транспорта. – 2010. – № 3. – с. 3–7.

11. Гречишников В.А., Подаруев А.И., Шевлюгин М.В., Преобразовательный агрегат ёмкостного накопителя энергии для системы тягового электроснабжения метрополитена. Электротехника. 2011. № 5. С. 17–22.

12. Оценка электромагнитной совместимости путевых устройств рельсовых цепей систем интервального регулирования и контроля электрооборудованием моделей вагонов метро и их модификаций на Московском метрополитене. Типовая методика ТМ 318370–07071–21ЖД06–2002. – М. – 2002.

13. Экспериментальные исследования и оценка работы оборудования и устройств в системе электроснабжения Московского метрополитена при питающем напряжении 20 кВ [Текст]: отчет о НИР; рук. Бадер М.П.; исполнители: М.П. Бадер, П.Ф. Бестемьянов, Ю.М. Иньков, А.И. Яковлев, В.Г. Гречишников, М.В. Шевлюгин, Е.Г. Щербина. – М., 2012. – 224 с.

14. Tzeng Y.S. Modes of operation in parallel-connected 12-pulse uncontrolled bridge rectifiers without an interphase transformer [Текст] / Y.S. Tzeng, N. Chen, R.N. Wu // Industrial electronics, IEEE Transactions on, – June 1997. – Vol. 44. – № 3. – p. 344–355.

15. Tzeng Y.S. Harmonic analysis of parallel-connected 12-pulse uncontrolled rectifier without interphase transformer [Текст] / Y.S. Tzeng // Electric Power Applications, IEEE Proceedings, – May 1998. – Vol. 145. – № 3. – p. 253–260.

Бадёр Михаил Петрович

Родился в 1947 году. В 1975 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог». Доктор технических наук, профессор. В 1999 году защитил докторскую диссертацию на тему «Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями». В настоящее время работает в МИИТе, заведует кафедрой «Электроэнергетика транспорта». Имеет более 300 научных трудов и патентов.

Гречишников Виктор Александрович

Родился в 1974 году. В 1996 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог». Доктор технических наук, доцент. В 2014 году защитил докторскую диссертацию на тему «Измерительно-аналитическая программно-аппаратная система защиты и диагностики основного оборудования тяговых подстанций постоянного тока». В настоящее время работает в МИИТе на кафедре «Электроэнергетика транспорта» в должности профессора. Имеет более 80 научных трудов и 3 патента.

Шевлюгин Максим Валерьевич

Родился в 1973 году. В 1996 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог». Доктор технических наук, доцент. В 2014 году защитил докторскую диссертацию на тему «Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии». В настоящее время работает в МИИТе на кафедре

«Электроэнергетика транспорта» в должности профессора. Имеет свыше 120 научных трудов.

Данг Вьет Фук

Родился в 1984 году. В 2009 году окончил Иркутский государственный технический университет (ИрГТУ) по специальности «Электрический транспорт». В настоящее время является аспирантом Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электрические станции и электроэнергетические системы». Имеет 6 научных трудов.

Бадюр Михаил

Was born in 1947. In 1975 he has graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a specialization in «Power supply of the electrified railway». Ph. D. in Technical Sciences, professor. In 1999 he has defended a Ph. D. thesis on a topic «Electro-magnetic compatibility in traction power supply system with feeders, railway automatic equipment and supply lines». Now he is working in MIIT, head of the Dept. «Electric power engineering of transport». He has more than 300 treatises and patents.

Gretchishnikov Victor

Was born in 1974. In 1996 he has graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in «Power supply of the electrified railways». Ph. D. in Technical Sciences, assistant professor. In 2014 he has defended a Ph. D. thesis on a topic «Measuring-analytical hardware-software protection and diagnostic system of the main equipment of direct current traction substations». Now he is working in MIIT on chair «Electric power engineering of transport». He has more than 80 treatises and 3 patents.

Shevliugin Maxim

Was born in 1973. In 1996 he has graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in «Power supply of the electrified railways». Ph. D. in Technical Sciences, assistant professor. In 2014 he has defended a Ph. D. thesis on a topic «Energy-saving technologies in railway transport and subway that are realized with the use of energy storage system». Now he is working in MIIT on chair «Electric power engineering of transport». He has more than 120 treatises.

Dang Viet Phuc

Was born in 1984. In 2009 has graduated Irkutsk State Technical University with a specialization in «Electric transport». Present time he is post-graduated student in Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a specialization «Electric stations and Electric power systems». He has 6 treatises.

Простой способ энергосбережения в тяговой сети переменного тока

// The simple way to energy savings in AC traction network //

**Герман Л.А., д.т.н., профессор,
Сухов М.Ю., к.т.н.,
Нижегородский филиал Московского государственного
университета путей сообщения (МИИТ),
г. Нижний Новгород**

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

**Муреев П.А., Куров Д.А., Фроловский А.В.,
Горьковская железная дорога, г. Нижний Новгород**

В статье рассматривается способ экономии энергии путем выравнивания напряжения на подстанциях, питающих одну межподстанционную зону, при помощи построения топографической диаграммы средних напряжений и ее оптимизации путем регулирования напряжения устройством УРПН и включением/отключением установок КУ и УПК. Ключевые слова: экономия, УРПН, УПК, среднее напряжение, топографическая диаграмма, дисперсия.

The article discusses the way to save energy by balancing the voltage at substations that feed one feeding zone by constructing a topographic diagram of middle voltage and its optimization by regulating voltage using transformers with OLTC and check on/off a parallel var compensation and longitude var compensation.

Keywords: economy, OLTC, longitude var compensation, middle voltage, topographic diagram, dispersion.

Проблема снижения потерь электроэнергии в тяговой сети переменного тока от уравнильного тока известна давно, но, к сожалению, эффективного решения для практического применения пока не найдено. Главные причины – постоянно изменяющийся уровень и несимметрия напряжения тяговых подстанций.

В настоящее время на отечественных железных дорогах переменного тока отсутствует автоматическое регулирование напряжения, и на всех трансформаторах тяговых подстанций устанавливается положение регулятора напряжения трансформатора (переключателя УРПН), позволяющее выдерживать нормативы по уровням предельных значений максимального и минимального напряжений на шинах 27,5 кВ, а также на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС), одновременно на токоприемнике ЭПС устанавливается желательное напряжение, близкое к номинальному 25 кВ.

Указанное не запрещает дополнительные дистанционные переключения УРПН оперативным персоналом в зависимости от изменения поездной обстановки и режима напряжения.

Требований равенства напряжений на одноименных фазах смежных подстанций для снижения уравнильного тока в нормативных документах нет и, как правило, в действительности эти напряжения не равны.

Предлагается способ рационального режима напряжения в тяговой сети, снижающего потери электроэнергии, отличающийся тем, что к существующим вышеуказанным требованиям установочных соответствующих положений переключателя УРПН добавляется требование равенства средних напряжений одноименных фаз напряжения смежных подстанций.

Таким образом, решается задача минимизации потерь электроэнергии в тяговой сети от уравнильных токов при соблюдении условия допустимых

уровней напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и тяговых подстанций.

Реализация предлагаемого рационального режима напряжения на тяговых подстанциях переменного тока выполняется следующим образом.

1. Строят топографическую диаграмму средних напряжений по плечам питания тяговых подстанций рассматриваемого участка по данным автоматизированной системы коммерческо-технического учета электроэнергии (АСКУЭ) за неделю.

2. Корректируют топографическую диаграмму с целью получения одинаковых СРЕДНИХ напряжений на одноименных фазах смежных подстанций и желательного уровня напряжения в тяговой сети с использованием УРПН трансформаторов.

3. При больших значениях разности напряжений отстающей и опережающей фаз используют установки поперечной (КУ) и продольной (УПК) емкостных компенсаций для снижения несимметрии напряжения.

4. Полученную топографическую диаграмму реализуют на действующем участке электроснабжения.

Рассмотрим более подробно алгоритм расчета и установки рационального режима напряжения на действующем участке электроснабжения. Прежде всего рассчитаем зависимость потерь электроэнергии от среднего значения уравнильного тока.

Потери электроэнергии от уравнильного тока

На отечественных железных дорогах принято двустороннее питание тяговой сети, и тяговая нагрузка получает питание, как правило, от двух тяговых подстанций. Это в определенной мере повышает надежность электроснабжения электроподвижного состава (ЭПС) и ведет к лучшему использованию кон-

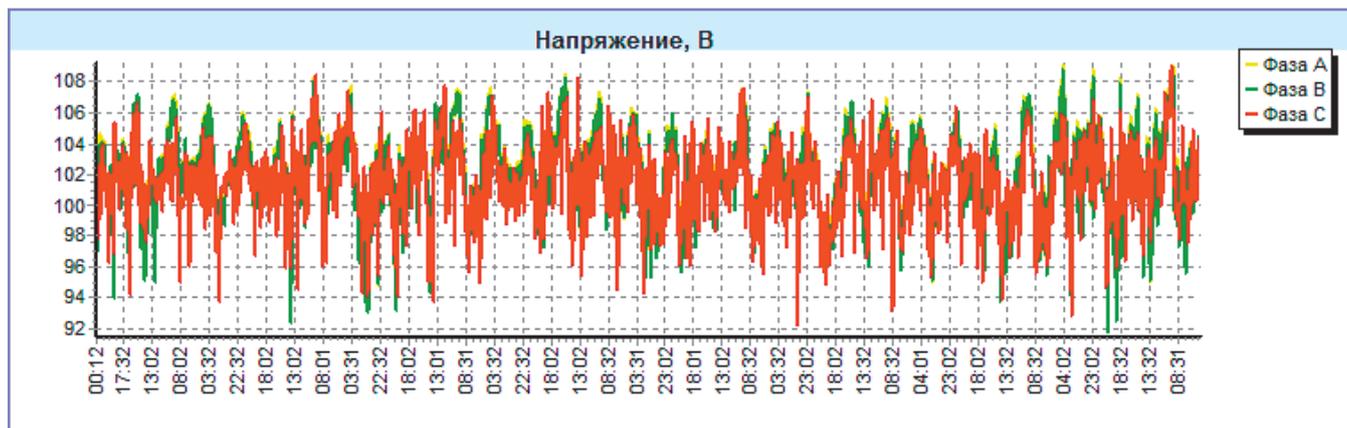


Рис. 1. Режим напряжения на тяговой подстанции переменного тока (опережающая – зеленая, красная – отстающая). По оси ординат – напряжение вторичной обмотки ТН – 27,5 кВ).

тактных подвесок. Однако при двустороннем питании появляется переток мощности (уравнительный ток) по тяговой сети, что приводит к дополнительным потерям напряжения и энергии, а в ряде случаев – к перегрузке трансформаторов.

Потери электроэнергии в тяговой сети от уравнительного тока составят [1]

$$\Delta P = I_{\text{кв}}^2 \cdot R_{\text{тс}} = [I_{\text{ср}}^2 + D(I_{\text{ср}})] \cdot R_{\text{тс}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{кв}}$, $I_{\text{ср}}$ – среднеквадратичное и среднее значения уравнительного тока;

$D(I_{\text{ср}})$ – дисперсия уравнительного тока;

$R_{\text{тс}}$ – активное сопротивление тяговой сети.

Значение $I_{\text{ср}}$ определяется разностью средних напряжений одноименных фаз смежных подстанций. Значение $D(I_{\text{ср}})$ определяется суммой дисперсий напряжения этих же фаз смежных подстанций. В среднем значения $I_{\text{ср}}^2$ и $D(I_{\text{ср}})$ примерно равны, при этом значение $D(I_{\text{ср}})$ уменьшается при увеличении мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговой подстанции.

Принимая, что напряжения смежных подстанций независимы, среднее значение уравнительного тока равно

$$I_{\text{ср}} = (U_{1\text{ср}} - U_{2\text{ср}}) / Z_{\text{тс}}, \quad (2)$$

где $U_{1\text{ср}}$ и $U_{2\text{ср}}$ – средние напряжения одноименных фаз смежных подстанций № 1 и 2.

Для снижения $I_{\text{ср}}$ достаточно, в частности, отрегулировать положения переключателя УРПН.

Для снижения $D(I_{\text{ср}})$ необходимо вводить регулирование напряжения на шинах 27,5 кВ.

Рациональный режим напряжения

При рациональном режиме напряжения тяговой сети переменного тока с двусторонним питанием устанавливается равенство напряжений по одноименным фазам смежных подстанций с целью снижения перетоков мощности по контактной сети. Указанный режим напряжения известен давно, в частности, в контактной сети постоянного тока он выполняется с помощью трансформаторов с бесконтактным регулированием [2]. Приведенный график напряжения по фазам за 20 суток тяговой подстанции переменного тока также доказывает, что стабилизация напряжения может осуществляться только при бесконтактном регулировании, что еще не разработано для тягового электроснабжения переменного тока.

Рассмотрим характеристику приведенного напряжения. Минимальные и максимальные напряжения соответственно равны 25,5 и 30 кВ при среднем напряжении 27,8 кВ, что свидетельствует о необходимости регулирования напряжения. Причем длительность наибольших напряжений составляет 10...20 мин, среднеквадратичное отклонение напряжения на этой подстанции – 733 В (для сравнения: на ближних от районной подстанции – 400 В). Важно указать, как видно на рис. 1, что наибольшие и наименьшие напряжения могут быть как на опережающей, так и на отстающей фазах, что объясняется приходящей несимметрией напряжения по ЛЭП-110 кВ.

В 1983 году на дороги поступила техническая информация [3], разработанная на основании опыта Горьковской железной дороги, по уравниванию средних напряжений на смежных под-

станциях [4]. Однако реализовать его по сети железных дорог переменного тока в те годы было затруднительно в связи с отсутствием информационной базы по режиму напряжения. В настоящее время введенная по сети железных дорог система АСКУЭ определяет напряжения по плечам питания за любой период времени (с измерениями через каждые 30 мин). Конечно, для повышения точности принятия решения желательно период измерения уменьшить, например, до 0,5–1 мин, что следует учесть в дальнейшем.

В тяговой сети переменного тока выполнить равенство напряжений на смежных подстанциях достаточно сложно из-за постоянно изменяющегося уровня и несимметрии напряжения на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций [6]. Поэтому с учетом существующей аппаратуры на тяговых подстанциях решено выполнять равенство напряжений не по мгновенным значениям, а по СРЕДНИМ значениям напряжения. Это значит, что равенство средних напряжений достаточно выполнить путем правильного подбора положения переключателей УРПН трансформаторов на смежных подстанциях. Тем самым будем уменьшать потери мощности в связи с уменьшением среднего значения уравнительного тока.

Оставшиеся потери мощности от уравнительного тока, определяемые дисперсией уравнительного тока (1), в дальнейшем можно снижать, используя автоматику регулирования напряжения. В связи с постоянным изменением тяговой нагрузки и, следовательно, напряжения на шинах 27,5 кВ в общем случае необходимо регулирование напряжения. Но заводской ресурс коммутационной аппаратуры устройств

регулирования УРПН трансформатора (до недавнего срока он был 100 тыс. переключений) ограничивает возможности регулирования. Однако ресурс современных УРПН – 500 тыс. переключений. Это значит, что если в сутки будет 20 переключений УРПН, то ресурс израсходуется через 70 лет. Это свидетельствует о том, что среднесуточное число переключений УРПН – 20 – вполне допустимо для новых трансформаторов. Опыт Горьковской железной дороги – тому подтверждение [6]. Многолетний опыт использования регулируемых УРПН на Горьковской железной дороге указывает на необходимость прежде всего выполнять переключения УРПН в зависимости от режима напряжения в системе внешнего электроснабжения, то есть выполнять переключения при переходе работы энергосистемы от минимального к максимальному режиму и наоборот. Для этого задержку на переключение УРПН в схеме автоматики следует выполнить в 10...15 мин и более. В этом случае среднесуточное число переключений – 6...10 – вполне достаточно для обеспечения надежной работы УРПН.

Интересен опыт Северной железной дороги по диспетчерскому регулированию УРПН [5], где модернизировали программное обеспечение системы телемеханики АСТМУ. Теперь у энергодиспетчера есть постоянная информация по напряжению плеч питания подстанций и в середине фидерной зоны между тяговыми подстанциями с постом секционирования, и по уровням напряжения и поездной обстановке он переключает УРПН по телеуправлению. Несомненно, эта полезная информация может быть использована и на других дорогах.

Измерения напряжения на тяговой подстанции

За многие десятилетия сложилась ситуация по измерениям постоянно изменяющегося напряжения на тяговой подстанции, когда эксплуатационный персонал оценивает напряжение по эпизодическому контролю стрелочного вольтметра на щитовой тяговой подстанции. С введением системы АСКУЭ возможно расширение измерения характеристик напряжения. На наш взгляд, следует определять следующие характеристики напряжения:

- среднее напряжение в сутки (неделю, месяц);
- среднеквадратичное отклонение (дисперсию) за этот же период;
- максимальное одноминутное (29 (28) кВ) с вероятностью 95%;
- минимальное одноминутное (21 (24) кВ) с вероятностью 95%.

Указанные характеристики следует вводить в интранет для использования эксплуатационным персоналом. Причем, по всей видимости, целесообразно принять период усреднения напряжения (сутки, неделя, месяц) и его среднеквадратичного отклонения (дисперсии) скользким. По среднему напряжению можно определять, например, правильность установки положения УРПН, а при повышенной дисперсии – необходимость введения регулирования напряжения на той или иной подстанции.

Что касается минимальных и максимальных значений напряжения, то при достижении ими предельных значений следует фиксировать время для последнего разбора причин выхода напряжения за допустимые значения.

Как правило, длительность измерения напряжения для усреднения соот-

ветствующего положения УРПН трансформатора определяется неделей по следующим причинам. Во-первых, по новому ГОСТ 32144–2013, длительность измерений нормируется неделей. Во-вторых, и это главное, график движения поездов придерживается недельной периодичности, для пассажирских поездов это как закон, а для грузовых – отклонения в суточном графике движения от планового, конечно, имеются, но в среднем за неделю среднее значение напряжения стабилизируется. Еще более стабильны средние напряжения за месяц.

Порядок построения и оптимизации топографической диаграммы

Для построения топографической диаграммы приняты обобщенные исходные данные по многолетнему опыту контроля режима напряжения на действующих участках тягового электроснабжения. Принятый электрифицированный участок системы 25 кВ по удельному электропотреблению относится к первой категории. Средние токи по плечам питания – 150–250 А. Тяговые подстанции подключены к двухцепной ЛЭП-110 кВ.

На основании измерений средних напряжений за неделю (месяц) на тяговых подстанциях ТП П1–П5 строится исходная топографическая диаграмма (рис. 2) с соблюдением отстающей (от) и опережающей (оп) фаз тяговых подстанций. Как видно (таблица 1, первая строка), разность напряжений между одноименными фазами составляет 380–800 В. Это приводит к значительным перетокам мощности по тяговой сети. Для уменьшения указанной разности

Таблица 1. Средние напряжения исходной и оптимизированной топографических диаграмм.

Положение УРПН и КУ	П1, кВ оп – от	Δ U, В	П2, кВ оп – от	Δ U, В	П3, кВ оп – от	Δ U, В	П4, кВ от – оп	Δ U, В	П5, кВ от – оп
Средние напряжения до оптимизации	27,14–26,97	800	27,77–27,66	380	28,04–27,73	480	27,25–27,69	560	27,13–27,48
РПН КУ	(+2)* (–)		(0)* (–)		(–1)* (–)		(0) (–)		(0) (+1 КУ)*
Средние напряжения после оптимизации	27,94–27,74	30	27,77–27,66	20	27,64–27,33	20	27,25–27,69	30	27,63–27,66

Обозначения в таблице:

(0)* – положение переключателя РПН не меняется;

(–1)* – переключатель РПН изменяет свое положение на единицу и увеличивает коэффициент трансформации на 1,78% (то есть напряжение на шинах 27,5 кВ понижается);

(+2)* – переключатель РПН изменяет свое положение на две единицы и уменьшает коэффициент трансформации на 2 x 1,78 (то есть напряжение на шинах 27,5 кВ повышается);

(+1 КУ)* – включено КУ на отстающую фазу, напряжение повышается на 0,5 кВ;

(–) – КУ отключено.

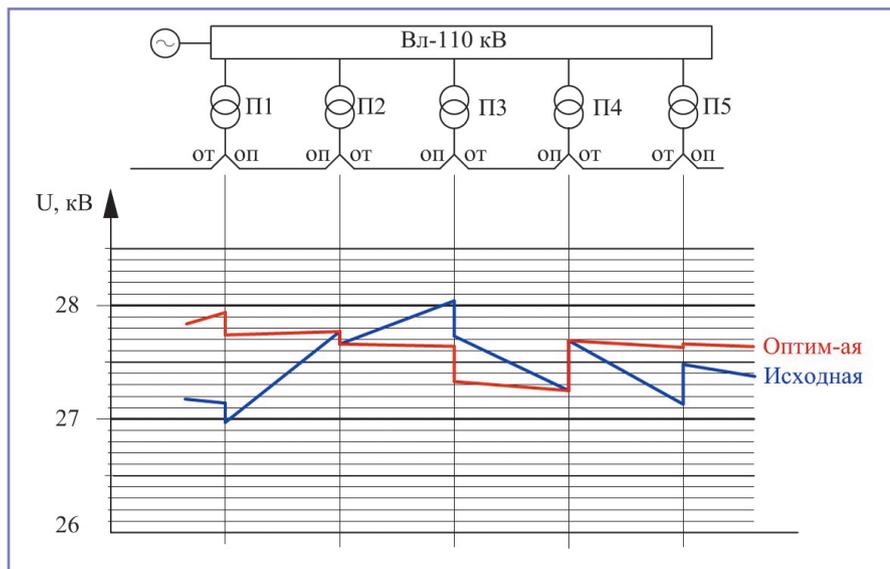


Рис. 2. Исходная и оптимизированная топографические диаграммы средних напряжений.

выполняются следующие технические решения.

1. На ТП П1 с помощью УРПН повышается напряжение (УРПН переключается на 2 положения).

2. На ТП П3 с помощью УРПН понижается напряжение (УРПН переключается на одно положение).

3. На ТП П5 включается КУ на отстающую фазу, на этой подстанции КУ находится в стадии модернизации.

Принимаем, что при переключении РПН на одно положение напряжение изменится на 0,4 кВ.

В результате расчетов оптимизированной диаграммы средних напряжений с указанными техническими решениями (таблица 1, строка 4) разность средних напряжений между подстанциями снизилась до 20–30 В, что эффективно снижает уравнительные токи. Результирующая диаграмма представлена на рис. 2.

В рассматриваемой диаграмме «перекосы» напряжения по фазам (разность напряжений отстающей и опережающей фаз) не превосходили 300–400 В. Однако при увеличении тяговых нагрузок «перекос» увеличивается. В этом случае необходимо применять установки поперечной (КУ) и продольной (УПК) емкостных компенсаций [8, 9]. Если ток КУ равен току нагрузки в отстающей фазе, то средние напряжения отстающей и опережающей фаз выравниваются. При увеличении мощности КУ среднее напряжение отстающей фазы может превосходить напряжение опережающей.

С применением в КУ пусковых устройств на резисторе [8] стало возмож-

ным применить ограниченное ступенчатое регулирование напряжения (до 10 переключений в сутки) путем отключения/включения КУ, то есть перевести их в режим отключаемых КУ. За длительный период эксплуатации КУ выяснено, что главная причина необходимости переключения КУ (особенно на постах секционирования) – повышение напряжения до 29 кВ и выше при снижении (и даже при отсутствии) тяговой нагрузки. Отключаемые КУ решают эту проблему. В частности, отключаемая КУ установлена на тяговой подстанции Буреполом (П5) Горьковской железной дороги, управление которой осуществляет энергодиспетчер (диспетчерское регулирование) в связи с частыми переключениями ЛЭП-110 кВ, питающей эту подстанцию.

По опыту на Горьковской железной дороге известно, что УПК – самое эффективное средство стабилизации и симметрирования напряжения, что подтверждено опытом эксплуатации за многие десятилетия. В частности, УПК на Горьковской железной дороге установлены на тяговых подстанциях Лянгасово, Игодино и Ацвеж.

Расчет экономического эффекта

По результатам расчета на рассматриваемом участке уравнительный ток уменьшается на одной зоне путем переключения УРПН на два положения (на 800 В) и на одно положение (на 400 В) – на двух последних зонах. Кроме того, с помощью включения КУ на одной зоне уменьшился уравнительный ток при снижении разности напряжений между подстанциями на 500 В. С некото-

рым приближением, используя расчеты по приложению, определим экономический эффект от снижения потерь электроэнергии:

$$\Delta \Delta = 180 \times 2 + 180 \times 2 = 720 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, по рассматриваемому примеру путем введения рационального режима потери электроэнергии от снижения уравнительного тока на участке с четырьмя межподстанционными зонами снижаются на 720 тыс. руб.

Применение рассматриваемого рационального режима возможно на электрифицированных участках всех железных дорог с двусторонним режимом питания контактной сети. Целесообразность его применения определяется тем, что этот способ снижения потерь мощности практически беззатратный. Примерно 10% всех межподстанционных зон отечественных железных дорог работают отдельно по контактной сети из-за соответствующих разделов питания по системе внешнего электроснабжения 110 (220) кВ. Для этих участков должны быть разработаны другие принципы рациональных режимов напряжения.

Расчет обобщенного экономического эффекта

Расчет выполним для двухпутного участка с параметрами контактной подвески [7] $z = 0,301 \text{ Ом/км}$ и $r = 0,117 \text{ Ом/км}$. Тогда для межподстанционной зоны в 45–55 км сопротивление равно $Z = (45-55) \times 0,301 = 13,5...16,55 \text{ Ом}$, $R = (45-55) \times 0,117 = 5,25...6,43 \text{ Ом}$.

При необходимости изменения положения переключателя на одно положение уравнительный ток изменится на

$$I_{ур} = (350...489) / (13,5...16,55) = 21,15...36,22 \text{ А,}$$

где 350...490 В – изменение напряжения при переключении УРПН на одно положение.

В этом случае при изменении положения переключателя на одно положение потери мощности снижаются на каждой межподстанционной зоне на

$$\Delta P = (21,15^2 \times 6,43 \dots 36,22^2 \times 5,25) = 2876...6887 \text{ Вт,}$$

а годовые потери электроэнергии снижаются на

$$\Delta W = (2876...6887) \cdot 10^{-3} \cdot 8760 \cdot 10^{-3} = 25,19 \dots 60,33 \text{ тыс. кВт.ч.}$$

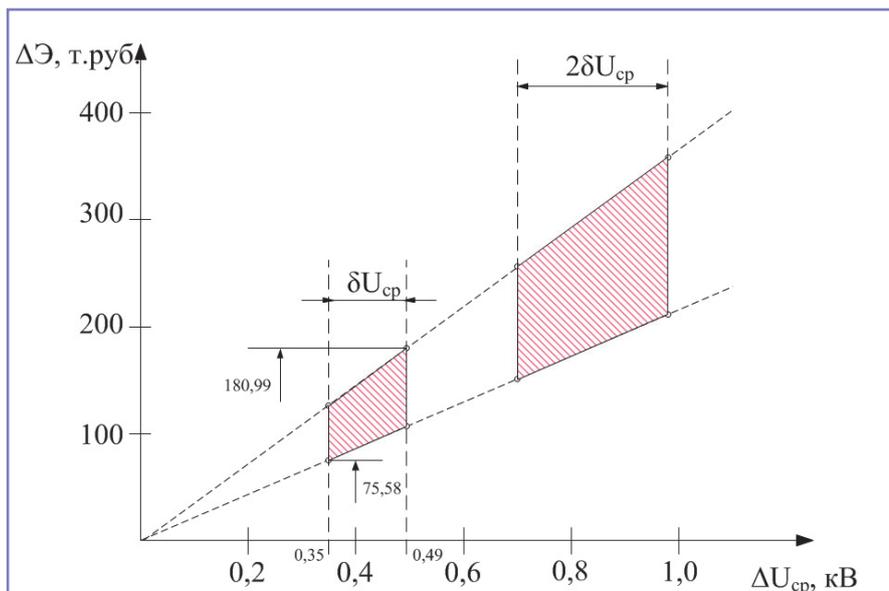


Рис. 3. График экономии электроэнергии.

Тогда годовая стоимость снижения потерь энергии на каждой межподстанционной зоне составит

$$\Delta \mathcal{E} = 21,19 \dots 60,33 \cdot 3 = 75,58 \dots 180,99 \text{ тыс. руб.},$$

где 3 руб./кВт. ч – стоимость электроэнергии.

Если же для уменьшения уравнительного тока необходимо переключить две позиции переключателя, то указанные потери электроэнергии и стоимость возрастает в два раза (рис. 3).

На основании полученных данных выполним ориентировочный расчет снижения потерь электроэнергии и стоимости потерь для Горьковской железной дороги.

Для расчета принимаем:

- на дороге 9 дистанций электроснабжения;
- на каждой дистанции электроснабжения в среднем 6 межподстанционных зон, и на двух из них изменяем положение переключателя УРПН, причем на одной зоне – на одно положение, а на другой – на два положения.

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E} &= 9 \times (75,58 \dots 180,99) (1 + 2) = \\ &= 2040,7 \dots 4886,7 \text{ тыс. руб.} \approx \\ &\approx 2 \dots 4,9 \text{ млн руб.} \end{aligned}$$

Таким образом, при введении рационального режима напряжения в тяговой сети переменного тока на всех участках Горьковской железной дороги можно ожидать снижения потерь электроэнергии стоимостью в 2... 4,9 млн руб., что соответствует экономии электроэнергии в 220–540 тыс. кВт. ч.

Литература

1. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. Монография. М.: РОАТ-МИИТ, 2012, 211 с.
2. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения: монография. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012, – 207 с.
3. Информация № П-159/83 от 07.12.1983 № ЦЭТ-20. Оптимизация режимов тяговых подстанций переменного тока. ЦЭ МПС.
4. А.С. 1359853. Способ снижения уравнительных токов в тяговой сети (Герман Л.А.). Опубл. 15.12.87. Бюлл. № 46.
5. Росляков Ю.А. Электроснабженцы – лауреаты конкурса «Бережливое производство». Локомотив, № 3–2015, с. 40–42.
6. Герман Л.А., Попов Д.С., Кишкурно К.В. Эффективный способ ресурсосбережения в тяговой сети переменного тока. Железнодорожный транспорт, № 12–2014 г.
7. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М. ЦЭ ОАО «РЖД». М.: «Трансиздат», 2005. – 216 с.
8. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. 183 с.
9. Герман Л.А., Новиков Е.В., Кишкурно К.В., Петров Д.В. «Сравнительная оценка способов симметрирования...». ЭЭТ № 4–2015, с. 2–7.

Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. Окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик» (1959 г.). 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. Является членом-корреспондентом Российской Академии транспорта. Автор более 350 научных трудов, 70 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

Сухов Михаил Юрьевич

Родился в 1937 году. В 1986 году окончил Горьковский политехнический институт по специальности «Инженер-электрик». Кандидат технических наук. В 1999 году защитил диссертацию по теме «Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока». Опыт работы – 28 лет. В настоящее время работает доцентом в Нижегородском филиале МИИТ. Имеет 20 статей, 1 патент.

Кишкурно Константин Вячеславович

Родился в 1991 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». В настоящее время является аспирантом кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения. Имеет 4 статьи, 1 патент.

Муреев Павел Анатольевич

Родился в 1971 году. В 2008 году окончил Нижегородский филиал МИИТ по специальности «Инженер путей сообщения». Опыт работы – более 20 лет. В настоящее время работает заместителем начальника Горьковской дистанции электроснабжения по тяговым подстанциям. Автор 1 статьи.

Куров Дмитрий Александрович

Родился в 1960 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения». Опыт работы – 33 года. В настоящее время работает начальником ремонтно-ревизионного участка Горьковской дистанции электроснабжения. Имеет 3 статьи, 3 патента.

Фроловский Сергей Владимирович

Родился в 1969 году. Окончил Нижегородский политехнический институт по специальности «Инженер-кораблестроитель». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время работает старшим электромехаником Дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) Горьковской железной дороги. Автор 2 статей.

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.

Sukhov Michael

Was born in 1937. In 1986 he graduated from Gorky Polytechnic Institute with specialization in «Electrical engineer». He is a Candidate of

Technical Sciences. In 1999 he defended a thesis in the subject «Voltage control in alternating current electric traction network». His work experience is 28 years. At present he works as associate professor in Nizhny Novgorod affiliate of MIIT. He has 20 articles, 1 patent.

Kishkurno Konstantin

Was born in 1991. In 2012 he graduated from Moscow State of Railway University (MIIT), speciality is «Railway roads power supply». At present he is an advanced student of «Electric railway roads power supply» chair of Moscow State of Railway University. He has 4 articles, 1 patent.

Mureyev Pavel

Was born in 1971. In 2008 he graduated from Nizhny Novgorod affiliate of MIIT with specialization in «Railway engineer». His work experience is more than 20 years. At present he works

as deputy director of Gorky electric power supply section for traction substations. He is an author of 1 article.

Kurov Dmitriy

Was born in 1960. In 2012 he graduated from MGUPS (MIIT) with specialization in «Railway engineer». His work experience is 33 years. At present he works as head of the repair-revisory division of Gorky electric power supply section. He has 3 articles, 3 patents.

Frolovskiy Sergey

Was born in 1969. In 2012 he graduated from Nizhny Novgorod State Technical University with specialization in «Naval constructor». His work experience is 18 years. At present he works as senior electrician of the Road electrical laboratory (REL) of Gorky railroad. He is an author of 2 articles.

Исследование износа изоляции ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях

// Network switching rectifier-inverter converter, depending on the parameters of the contact network and the number of sections of a locomotive //

Попов Ю.И.
ПКБ ЦТ, г. Москва

В статье приведены методики расчета теплового и термомеханического износов изоляции ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых на участках железных дорог со сложными природно-климатическими условиями (СПКУ). Представлены результаты исследования термомеханического износа изоляции, обусловленного снижением ее упругости при низких температуре и абсолютной влажности воздуха при пропитанных и непропитанных обмотках ТЭМ.
Ключевые слова: локомотив, тяговая электрическая машина, изоляция, тепловой износ, термомеханический износ.

Анализ безотказности ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях, свидетельствует о существенной доле теплового старения в износе их изоляции [1–3]. Это указывает на необходимость определения скорости и величины износа изоляции для установления срока ее службы. Используя методику определения теплового старения асинхронных двигателей, основанную на зависимости скорости химических реакций изоляции от температуры Вант-Гоффа и Аррениуса, можно якорь ТЭМ с точки зрения его нагрева рассматривать как систему двух тел – обмотки и стали (рис. 1). Тела 1 и 2 (обмотка и сталь) обладают теплоемкостью C_1 и C_2 и связаны между собой тепловой проводимостью Λ_{12} , а с окружающей средой – Λ_1 и Λ_2 . В теле 1 выделяются потери P_1 , в теле 2 – P_2 . Предполагается, что теплоемкость и тепловая проводимость не зависят от температуры, теплоемкость окружающей среды C_{cp} равна бесконечности, температура окружающей среды ϑ_{cp} постоянна.

Составим уравнения теплового баланса для каждого тела обмотки (тело 1) и стали (тело 2):

The article presents the methods of calculation of thermal and thermo-mechanical wear of traction electric machine insulation for locomotives operating on track sections with complicated climate conditions. It gives the results of the study of thermo-mechanical wear of the insulation of traction electric machine with impregnated and non-impregnated winding, caused by a decrease of isolation elasticity due to low temperatures and absolute air humidity.

Keywords: locomotive, electric traction machine, insulation, thermal wear, thermo-mechanical wear.

$$P_{10}(1 + \alpha\tau_1)dt = C_1 d\tau_1 + \Lambda_1 \tau_1 dt + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt; \quad (1)$$

$$P_2 dt + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt = C_2 d\tau_2 + \Lambda_2 \tau_2 dt, \quad (2)$$

где τ_1 и τ_2 – превышения температуры обмотки и стали над температурой окружающей среды, °C; α – температурный коэффициент сопротивления материала проводника обмотки, 1/°C.

$$D_i = \int_0^{t_i} e^B \left(\frac{1}{\theta_H} \frac{1}{\tau_{yi}(1-e^{-t/T}) + \tau_{i-1} e^{-t/T} + \Delta\tau_{vi} + \vartheta_{cp} + 273} \right) dt, \quad (8)$$

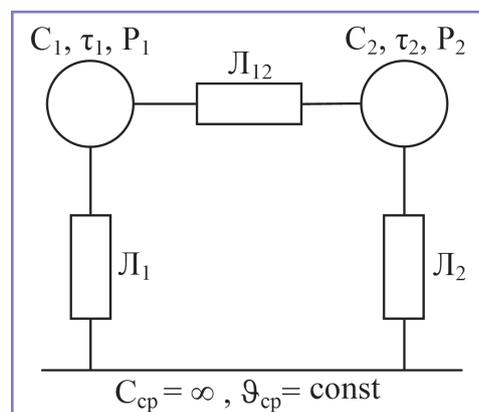


Рис. 1. Тепловая схема замещения якоря ТЭМ.

После решения системы уравнений и преобразований установившееся значение превышения обмотки якоря составит

$$\tau_y = \frac{\tau_H + \tau_K(\kappa_i^2 - 1)}{1 - \alpha\tau_K(\kappa_i^2 - 1)}, \quad (3)$$

где τ_H и τ_K – превышение температуры обмотки в номинальном режиме и в опыте короткого замыкания; $\kappa_i = I_i/I_H$.

В номинальном режиме

$$\tau_H = \Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н} / A, \quad (4)$$

где $\Delta P_{с.н}$ и $\Delta P_{м.н}$ – номинальные потери в стали и меди якоря ТЭМ, Вт; A – эквивалентная теплоотдача обмотки, Дж/с·°C.

В опыте короткого замыкания

$$\tau_K = \Delta P_{м.н} / A. \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (4) и (5), находим

$$\tau_K = \tau_H / 1 + \alpha, \quad (6)$$

где $\alpha = \Delta P_{с.н} / \Delta P_{м.н}$.

Подставив выражение (6) в уравнение (3), получим

$$\tau_y = \tau_H \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1 - \alpha\tau_H(\kappa_i^2 - 1)}. \quad (7)$$

Тепловой износ изоляции якоря ТЭМ на i -м участке:

где B – постоянный коэффициент, характеризующий способность молекул изоляции к химическому взаимодействию, K ; θ_H – предельно допустимая температура класса нагревостойкости изоляции, K ; ϑ_{cp} – температура окружающей среды, °C; τ_{yi} – установившееся превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды на i -м участке, °C; $\Delta\tau_{vi}$ – среднее превышение температуры вентилирующего воздуха над температурой окружающей среды на i -м участке, °C.

Суммарный тепловой износ изоляции якоря ТЭМ:

$$D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n D_i. \quad (9)$$

Режимы работы тяговых электрических машин таковы, что температура изоляции в процессе работы не остается постоянной. При анализе влияния переменной температуры на срок службы изоляции удобно ввести в рассмотрение величину, обратную сроку службы, – скорость старения изоляции при данной температуре $d(\theta) = 1/T(\theta)$. Примем допущение о том, что скорость старения изоляции определяется температурой только в данный момент.

Средняя скорость старения изоляции d_{cp} оказывается выше, чем она была бы при неизменной температуре $\theta = \theta_{cp}$. Это связано с тем, что при положительном отклонении температуры от средней на отдельных участках скорость старения возрастает больше, чем снижается при таком же отклонении температуры от θ_{cp} .

Средняя скорость старения изоляции является удобным показателем, достаточно точно характеризующим данный температурный режим.

Действительно, принимая во внимание, что периоды колебаний температуры намного (на пять-шесть порядков) меньше срока службы изоляции, скорость старения d_{cp} изоляции принимает установившееся значение за время $T \ll T_{ca}$. Поэтому достаточно точным является выражение, определяющее износ изоляции D за время эксплуатации T_3 , в виде

$$D = T_3 d_{cp} = \sum_i d_i \Delta t_i, \quad (10)$$

где T_3 – срок эксплуатации, $T_3 = \sum \Delta t_i$; $d_i \Delta t_i$ – износ изоляции за время Δt_i работы при температуре θ_i .

Последнее выражение позволяет заключить, что если колебания температуры невелики и в этой зоне можно принять линейную аппроксимацию кривой $d(\theta)$ в окрестности средней температуры θ_{cp} , то средняя скорость старения изоляции d_{cp} , определяющая достаточно точно напряженность теплового режима, будет зависеть только от средней температуры изоляции.

Однако такие условия возникают не всегда, поэтому необходимо рассмотреть влияние колебаний температуры на среднюю скорость старения изоляции и определить оценки допустимости теплового режима в этом случае.

Запишем выражение для средней скорости старения изоляции при конечном числе уровней температуры в виде

$$d_{cp} = \sum_i \frac{1}{T(\theta_i)} \left(\frac{\sum_k \Delta t_{ik}}{T_3} \right), \quad (11)$$

где k – число одинаковых уровней температуры θ_i в цикле.

Отношение, записанное в скобках в (11) [обозначим его $p_i = \left(\frac{\sum_k \Delta t_{ik}}{T_3} \right)$], есть относительная доля времени в цикле с уровнем температуры θ_i . Если изменения температуры непрерывны, то можно использовать функцию плотности значений p_i , то есть $f(\theta)$. При этом относительное время пребывания $\theta(t)$ в интервале $\theta_i + d\theta$ есть $p_i = f(\theta)d\theta$. Так как $\sum_i \sum_k \Delta t_{ik} = T_3$, то $\sum_i p_i = 1$ и $\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} f(\theta)d\theta = 1$.

Используя характеристики процесса $p_i(\theta)$ и $f(\theta)$, с помощью которых компактнее выражаются средние значения, запишем d_{cp} в виде

$$d_{cp} = \sum_i \frac{1}{T(\theta_i)} p_i(\theta_i), \quad (12)$$

для непрерывных: $d_{cp} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{T(\theta)} f(\theta) d(\theta)$.

Примем в качестве аппроксимирующей функции для $d(\theta_i)$ экспоненциальную

$$d(\theta) = 1/T(\theta) = d_{\sigma} e^{-(\theta - \theta_{\sigma})/\kappa}, \quad (13)$$

где θ_{σ} – базовая температура; κ – коэффициент, зависящий от класса нагревостойкости изоляции.

В таком виде $d(\theta)$ представлена в окрестности некоторой базовой температуры θ_{σ} , которой соответствует скорость старения $d_{\sigma} = d(\theta_{\sigma})$, в функции отклонения текущего значения θ от θ_{σ} .

Подставляя аппроксимацию зависимости скорости старения изоляции от температуры, представим ее разложением по степеням $(\theta - \theta_{\sigma})/\kappa$ и получим

$$d_{cp} = \int_0^{\infty} d(\theta_{\sigma}) \left(1 + \frac{\theta - \theta_{\sigma}}{\kappa} + \frac{(\theta - \theta_{\sigma})^2}{2\kappa^2} + \frac{(\theta - \theta_{\sigma})^2}{6\kappa^2} + \dots \right) f(\theta) d\theta. \quad (14)$$

По структуре d_{cp} , определяемая интегралом, состоит из произведения скорости старения, соответствующей базовой температуре θ_{σ} , и суммы единицы и средних отклонений температуры от базовой в возрастающих степенях, деленных на соответствующие коэффици-

енты. Упростим, приняв $\theta_{\sigma} = \theta_{cp}$, то есть рассмотрим разложение $d(\theta)$ относительно средней температуры θ_{cp} , и ограничимся лишь членом второго порядка. Учитывая при интегрировании, что

$$\int_0^{\infty} f(\theta) d\theta = 1; \quad \int_0^{\infty} \theta f(\theta) d\theta = \theta_{cp},$$

получаем

$$d_{cp} = d(\theta_{cp}) (1 + \sigma^2 \{\theta\} / 2\kappa^2), \quad (15)$$

где $\sigma^2 \{\theta\} = \int_0^{\infty} (\theta - \theta_{cp})^2 f(\theta) d\theta$ –

средний квадрат отклонения температуры от среднего значения.

Неучет при интегрировании членов начиная с четвертого вносит, естественно, погрешность в оценку d_{cp} , но в худшем случае погрешность не превышает 0,05. Итак, средняя скорость старения изоляции при принятых условиях определяется средним значением температуры θ_{cp} и характеристикой отклонения температуры от средней – средним квадратом отклонения температуры от среднего значения. Важно заметить здесь, что если ограничить число членов в разложении не тремя, как было сделано, а двумя, то есть принять линейность зависимости $d\theta$ в окрестности точки $\theta = \theta_{cp}$, то получим $d_{cp} = d(\theta_{cp})$. Теряется возможность учета влияния колебаний температуры на скорость старения изоляции. Пренебрежение колебаниями температуры эквивалентно пренебрежению нелинейностью кривой $T(\theta)$ и, соответственно, $d(\theta)$.

Для иллюстрации с помощью соотношения вычислим d_{cp} для трех различных по характеру температурных режимов. Пусть для одного из них температуру в течение срока службы можно считать постоянной и равной $\theta = \theta_{cp}$ (рис. 2а). Распределение температуры $f(\theta)$ для такого режима есть δ -функция, при этом средний квадрат отклонения температуры от среднего значения для такого режима равен нулю: $\sigma_1^2 \{\theta\} = 0$.

При колебании температуры около среднего значения θ_{cp} : $\theta_{cp} = \theta_{cp2} = \theta_{cp1}$, распределение температуры в диапазоне $\theta_{cp2} \pm \Delta\theta_2$ равномерно, то есть для такого графика характерно одинаковое время пребывания функции $\theta(t)$ в любом интервале всего диапазона. Поэтому $f(\theta)$ имеет вид, показанный на рис. 2б, а средний квадрат отклонения такого распределения

$$\sigma_2^2 \{\theta\} = \int_{\theta_{cp} - \Delta\theta}^{\theta_{cp} + \Delta\theta} (\theta - \theta_{cp})^2 \times \times \frac{1}{2\Delta\theta_2} d\theta = \frac{\Delta\theta_2^2}{3}. \quad (16)$$

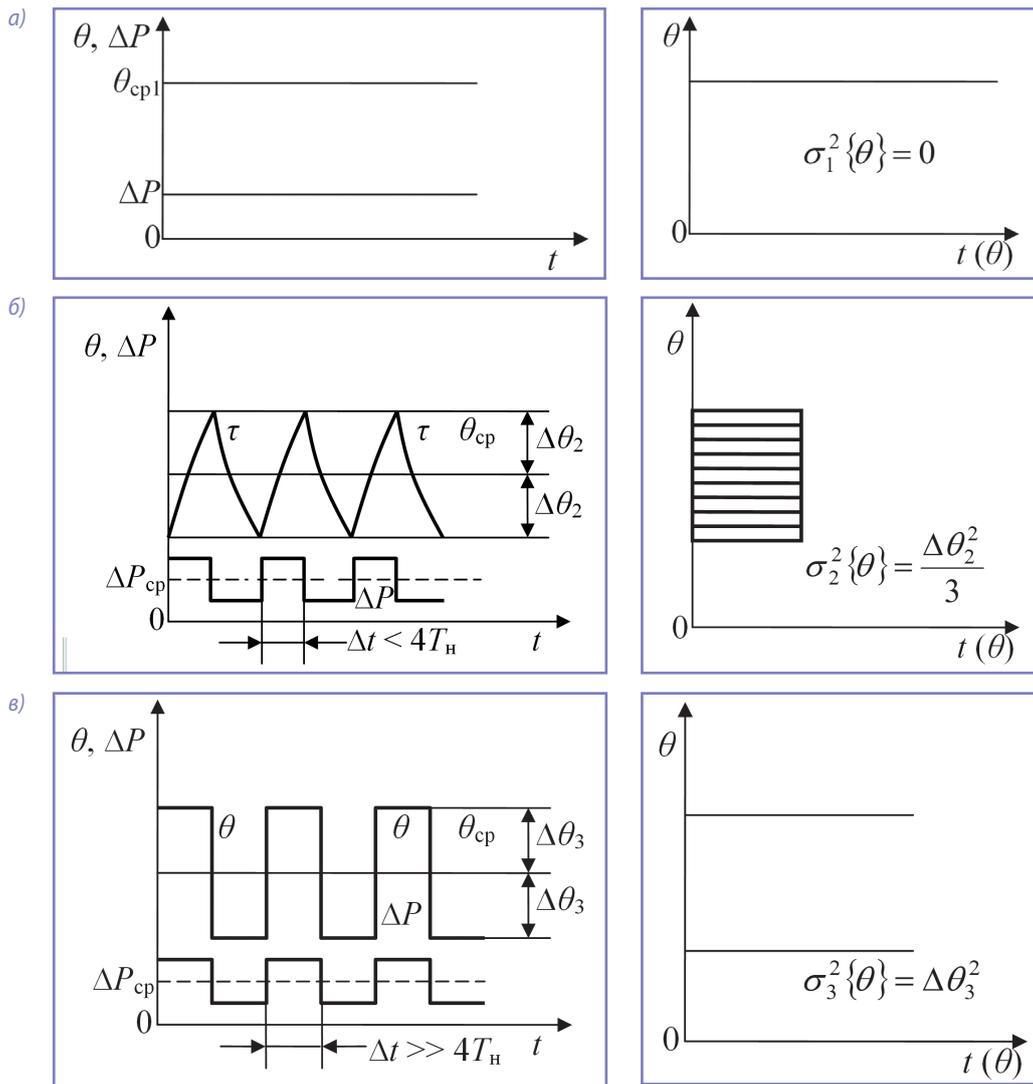


Рис. 2. Распределение температуры $f(\theta)$ для графиков различного характера температурных режимов.

Пусть для третьего режима $\theta_{cp3} = \theta_{cp2} = \theta_{cp1}$ и $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_3$, но время изменения температуры от $\theta_{cp3} + \Delta\theta_3$ до $\theta_{cp3} - \Delta\theta_3$ и от $\theta_{cp3} - \Delta\theta_3$ до $\theta_{cp3} + \Delta\theta_3$ намного меньше участков с неизменной температурой, а относительное время верхнего и нижнего уровней температур одинаково, чему соответствует распределение $f(\theta)$ (рис. 2в).

В этом случае $\sigma_3^2\{\theta\}$ есть $\Delta\theta_3^2$, так как все отклонения одинаковы и равны $\Delta\theta_3$. Воспользуемся теперь выражением для количественной оценки d_{cp} , для указанных режимов принимаем $\kappa = 14^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_3 = 10^\circ\text{C}$ и получаем

$$d_{cp1} = d(\theta_{cp}), \quad (17)$$

$$d_{cp2} = d(\theta_{cp}) \left(1 + \frac{100}{3 \cdot 2 \cdot 196}\right) = 1,085d(\theta_{cp}), \quad (18)$$

$$d_{cp3} = d(\theta_{cp}) \left(1 + \frac{100}{2 \cdot 196}\right) = 1,25d(\theta_{cp}). \quad (19)$$

Анализ гистограмм колебаний температуры якорных обмоток ТЭМ электровоза ВЛ 80Р при ведении грузовых поездов массой 1600, 4200 и 5700 т по участку Красноярской железной дороги, приведенных на рис. 3 – рис. 5, и расчет по (18) показали, что колебания температуры обмоток, вызывающие термомеханическое старение изоляции, увеличивают ее износ, соответственно, на 2,9; 18,1 и 33,8% по сравнению с тепловым износом при неизменной средней температуре обмотки.

Термомеханическое старение изоляции непропитанных якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ 85 Восточно-Сибирской железной дороги значительно возрастает из-за пониженной упругости (хрупкости) изоляции как в зимний, так и, в еще большей степени, в летний период эксплуатации, на что указывают зависимости безотказности изоляции непропитанных якорных обмоток ТЭМ

от среднемесячных значений температуры и абсолютной влажности воздуха, приведенные на рис. 6 и рис. 7.

Термомеханическое старение изоляции пропитанных якорных обмоток ТЭМ (рис. 8, рис. 9) меньше, чем непропитанных. Число отказов изоляции якорных обмоток этих ТЭМ с повышением среднемесячных температуры и абсолютной влажности воздуха снижается. После пропитки безотказность изоляции якорей повысилась в 1,8–1,9 раза. Установленный характер изменения безотказности изоляции якорных обмоток после пропитки от среднемесячных значений температуры и абсолютной влажности воздуха очевидно обусловлен изменением упругости изоляции. При наибольшей в течение года абсолютной влажности воздуха 12–13 мм рт. ст. в летний период эксплуатации изоляция упруга, число отказов изоляции минимально. В зимний период эксплуатации абсо-

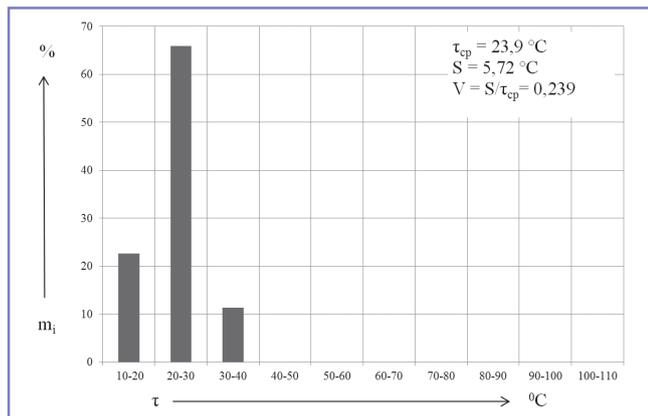


Рис. 3. Превышение температуры якорной обмотки ТЭМ электровоза ВЛ 80Р над температурой охлаждающего воздуха при ведении поезда массой 1600 т.

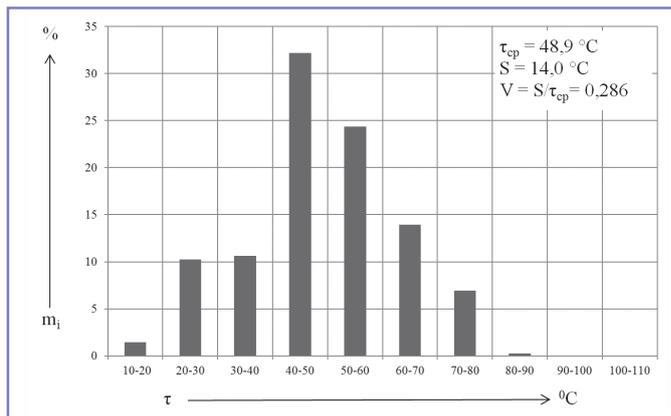


Рис. 4. Превышение температуры якорной обмотки ТЭМ электровоза ВЛ 80Р над температурой охлаждающего воздуха при ведении поезда массой 4200 т.

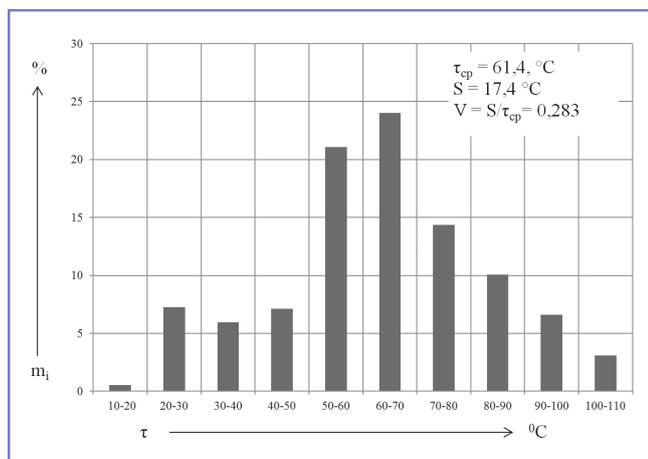


Рис. 5. Превышение температуры якорной обмотки ТЭМ электровоза ВЛ 80Р над температурой охлаждающего воздуха при ведении поезда массой 5700 т.

лютная влажность воздуха уменьшается до 1–2 мм рт. ст. и менее. При этом упругость изоляции резко снижается, из-за хрупкости изоляции число ее отказов возрастает в 2,0–2,5 раза.

Для анализа динамики процессов теплообмена в изоляции обмоток ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях, предлагается следующая система дифференциальных уравнений:

Система уравнений (20) показывает, что изменение объема V обмоток ТЭМ с течением времени t происходит под действием трех движущих сил: изменения влагосодержания G в изоляции, температуры и давления P_m . В результате этого в изоляции происходит образование микротрещин и микропустот. Коэффициенты тепло- и массопереноса $K_{11}–K_{44}$ определяются по эмпирическим данным графиков и таблицам для

данного класса изоляции обмоток ТЭМ. Под действием этих трех движущих сил происходит увеличение или уменьшение объемов изоляции обмоток ТЭМ. Трудности разработки схемы численного решения системы дифференциальных уравнений (20) связаны с определением коэффициентов тепло- и массопереноса.

Выход из данной ситуации заложен в анализе кривых роста и скорости роста объема обмоток ТЭМ в процессах переноса из массы тепла и влаги. Кривые изменения объема изоляции обмоток ТЭМ и кривые сорбции и десорбции изоляции имеют одинаковый S-образный вид. Кривые скорости изменения объема изоляции имеют трапецеидальный вид. Это объясняется наличием в процессах увлажнения и высыхания изоляции ТЭМ трех основных периодов: нарастающей, постоянной и спадающей скоростей изменения объема изоляции обмоток ТЭМ. Все три периода описыва-

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial G}{\partial t} &= K_{11} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right) + K_{12} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \\
 &+ K_{13} \left(\frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{14} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial \vartheta}{\partial t} &= K_{21} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right) + K_{22} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \\
 &+ K_{23} \left(\frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{24} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial P_m}{\partial t} &= K_{31} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right) + K_{32} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \\
 &+ K_{33} \left(\frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{34} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial V}{\partial t} &= K_{41} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right) + K_{42} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \\
 &+ K_{43} \left(\frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{44} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right),
 \end{aligned} \tag{20}$$

где $\frac{\partial G}{\partial t}$ – локальное изменение переноса влаги в изоляции обмоток ТЭМ во времени; G – влагосодержание в изоляции; ϑ – температура изоляции обмоток; P_m – давление в изоляции; V – объем обмоток ТЭМ.

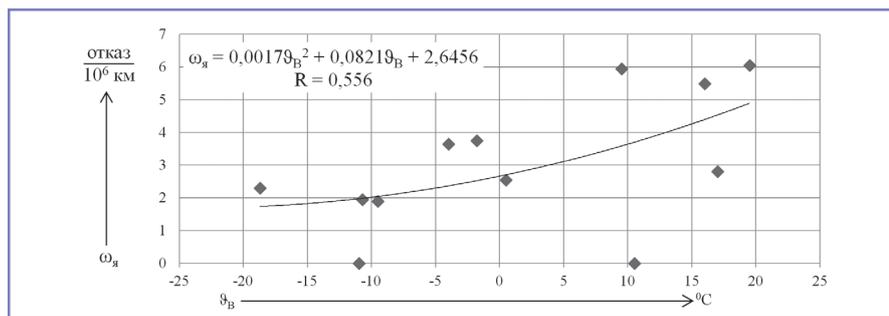


Рис. 6. Зависимость параметра потока отказов непропитанных якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ 85 от среднемесячной температуры воздуха.

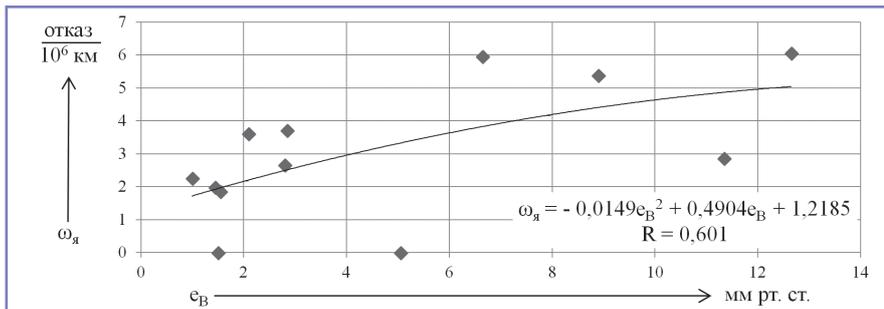


Рис. 7. Изменение показателя безотказности непропитанных якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ 85 от среднемесячных значений абсолютной влажности воздуха.

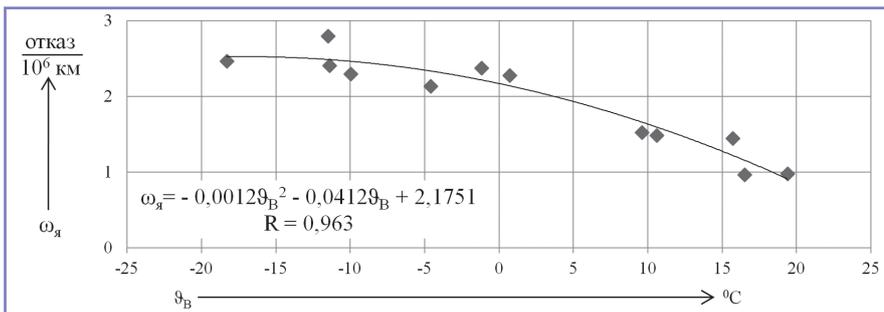


Рис. 8. Зависимость параметра потока отказов пропитанных якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ 85 от среднемесячной температуры воздуха.

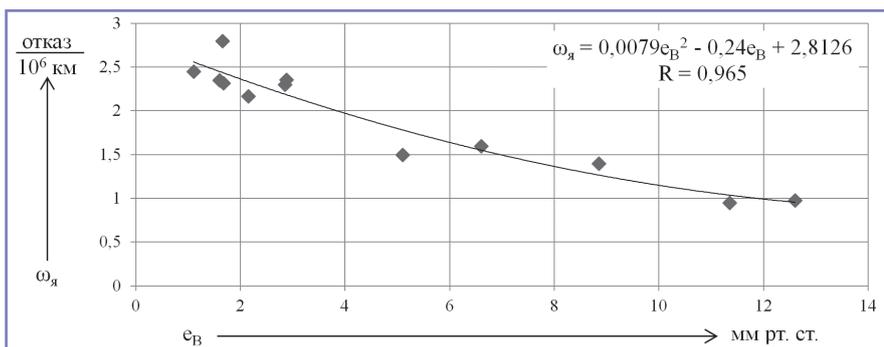


Рис. 9. Изменение показателя безотказности пропитанных якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ 85 от среднемесячных значений абсолютной влажности воздуха.

ются одним уравнением – уравнением S-образной кривой:

$$\pm \frac{\partial V}{\partial t} = K_m (V_{\text{разн}}^{\text{кон}} - V) * (V - V_{\text{разн}}^{\text{нач}}). \quad (21)$$

Уравнение (21) рассматривает протекание процесса переноса тепла и влаги в изоляции обмоток ТЭМ под действием двух движущих сил – отклонения текущего объема изоляции обмоток ТЭМ V от начального разнообъемного значения до конечного разнообъемного значения.

Наличие положительного и отрицательного знаков перед уравнением (21) указывает на то, что в процессах тепло- и влагообмена за счет всех движущих сил происходит увеличение или уменьшение объема изоляции обмоток ТЭМ.

Окончательный результат решения уравнения (21) для начальных условий $t = 0$ и $V = V_H$ имеет вид

$$t = \frac{1}{K_m (V_{\text{разн}}^{\text{кон}} - V_{\text{разн}}^{\text{нач}})} * \ln \left(\frac{(V_H - V_{\text{разн}}^{\text{нач}})(V_{\text{разн}}^{\text{кон}} - V)}{(V_{\text{разн}}^{\text{кон}} - V_H)(V - V_{\text{разн}}^{\text{нач}})} \right). \quad (22)$$

Трудности применения уравнения (22) связаны с нахождением параметров и K_m . Эти параметры можно определить, получив и решив системы уравнений кинетики процесса переноса тепла и влаги, отражающих взаимосвязь между тепло- и влагообменом и изменением объема обмоток ТЭМ. Из дифференциального уравнения энергетического баланса применительно к процессу нагрева изоляции обмоток ТЭМ определяется

$$t = T * \ln \frac{\tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{min}}}, \quad (23)$$

где T – постоянная времени нагрева изоляции ТЭМ; τ_{max} – максимальное превышение температуры изоляции

над температурой окружающей среды; τ_{min} – минимальное превышение температуры изоляции над температурой окружающей среды.

Считая, что существует полное совпадение по фазам между явлениями тепло- и влагообмена и изменением объема изоляции ТЭМ, выражения (22) и (23) после определенных преобразований дают величину K_m , которую можно использовать в качестве модифицированного обобщенного диагностического параметра при прогнозировании состояния изоляции обмоток ТЭМ.

Литература

1. Попов Ю.И., Куренков А.С., Глуценко М.Д., Смирнов В.П. Исследование состояния тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях // Наука и техника транспорта, 2015. № 1. – С. 45–52.
2. Попов Ю.И., Соколов О.О. Исследование процесса снижения электрической прочности изоляции тяговых электрических машин локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях // Наука и техника транспорта, 2015. № 2. – С. 89–97.
3. Исмаилов Ш.К., Смирнов В.П., Худонов А.М. Диагностирование изоляции тяговых электродвигателей локомотивов и обеспечение оптимального температурно-влажностного режима ее эксплуатации. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012–270 с.
4. Туйгунова А.Г. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Совершенствование содержания изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий». Красноярск, 2011 – 130 с.

Попов Юрий Иванович

Родился в 1961 году. В 1983 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Опыт работы – 34 года. В настоящее время работает директором Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства – филиала ОАО «РЖД» (ПКБ ЦТ). Имеет 1 патент на полезную модель, 23 научные работы.

Popov Yuriy

Was born in 1961. In 1983 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a specialization in «Railway engineer – electromechanician». His work experience is 34 years. At present he works as director of the Design center of the locomotive facility – an affiliate of JSC «RZD». He has 1 useful model patent, 23 scientific works.

Совершенствование вспомогательного электропривода электрического подвижного состава

// Auxiliary electro drive improving of electric rolling stock //

**Плакс А.В., д.т. н., профессор,
Евстафьев А.М., к.т. н., доцент,
Якушев А.Я., к.т. н., доцент,
Теличенко С.А.,
ПГУПС, г. Санкт-Петербург**

Рассматривается применение для вспомогательного асинхронного электропривода электрического подвижного состава частотного регулирования. Улучшение качества регулирования системы автоматического управления возможно с помощью применения регуляторов на основе нечеткой логики. Разработана компьютерная модель регулятора и приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: электрический подвижной состав, вспомогательный асинхронный привод, частотное регулирование, регулятор с нечеткой логикой, компьютерная модель.

Задачи энергосбережения на железнодорожном транспорте не только актуальны, но и приобретают первостепенное значение. Внедрение энергоэффективных технологий и конструкторских решений позволяет существенно экономить энергоресурсы. Снизить энергопотребление и повысить надежность электроподвижного состава возможно за счет совершенствования системы вспомогательного привода. На электровозах переменного тока питание трехфазных асинхронных двигателей вспомогательных машин осуществляется от однофазной сети с помощью простых и надежных систем преобразования числа фаз, разработанных в 60-х годах прошлого века. В то же время эти системы характеризуются несовершенными энергетическими и эксплуатационными показателями.

Перспективным направлением совершенствования вспомогательного электропривода является применение для асинхронных электродвигателей частотного регулирования.

Shown application of auxiliary asynchronous electro drive of electric rolling stock with frequency regulation. Improving the regulation quality of automatic control system possible by using the controls on the basis of fuzzy logic. Developed a computer model of the regulator and show simulation results.

Keywords: electric rolling stock, auxiliary asynchronous electro drive, frequency regulation, fuzzy controller, computer model.

Для получения высокого качества управления электроприводом широко используется система, основанная на векторном управлении асинхронным двигателем, позволяющая оперативно с высокой точностью управлять электромагнитным моментом двигателя.

Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя определяется величиной и фазой двух составляющих: тока и магнитного потока. Для получения требуемого электромагнитного момента в асинхронном электродвигателе используют единственно доступные для измерения величины – фазные токи статора, который в системе управления программно преобразуются в обобщенный вектор тока и разделяется на две координатные составляющие, обеспечивающие формирование магнитного потока и электромагнитного момента. В этом случае система управления построена во вращающихся координатных осях, ориентированных по результирующему вектору потокосцепления ротора. Модуль вектора пото-

косцепления ротора двигателя определяется проекцией вектора тока статора на ось системы координат, совмещенной с вектором потокосцепления ротора, а электромагнитный момент двигателя – произведением модуля потокосцепления ротора двигателя на вторую (ортогональную) составляющую вектора тока статора. Таким образом, можно построить двухканальную систему регулирования с независимым управлением потокосцеплением и электромагнитным моментом асинхронного двигателя.

Модель системы автоматического регулирования асинхронного электропривода при векторном управлении во вращающейся системе координат содержится в демонстрационных примерах программы MatLab с приложением Simulink. Общий вид модели показан на рис. 1. Модель состоит из нескольких подсистем: InductionMotor – подсистема, моделирующая параметры асинхронного двигателя; подсистема IGBT Inverter представляет собой модель автономного инвертора тока на IGBT-транзисторах; подсистема Vector Control моделирует работу системы векторного управления асинхронным двигателем; VDC – блок источника постоянного напряжения.

Структура блока Vector Control системы управления приводом, показанная на рис. 2, содержит следующие подсистемы: Speedcontroller – регулятор скорости, сравнивающий заданную скорость вращения ротора ω^* с действительной ω и по сигналу согласования формирующий заданное значение электромагнитного момента T_e^* ; подсистемы i_{qs}^* calculation и i_{ds}^* Calculation производят расчет значений проекций обобщенного вектора тока на оси вращающейся системы координат; подсистемы $dqto\ ABC\ conversion$ и $ABC\ todqconversion$ представляют собой координатные преобразователи прямого и обратного каналов соответственно;

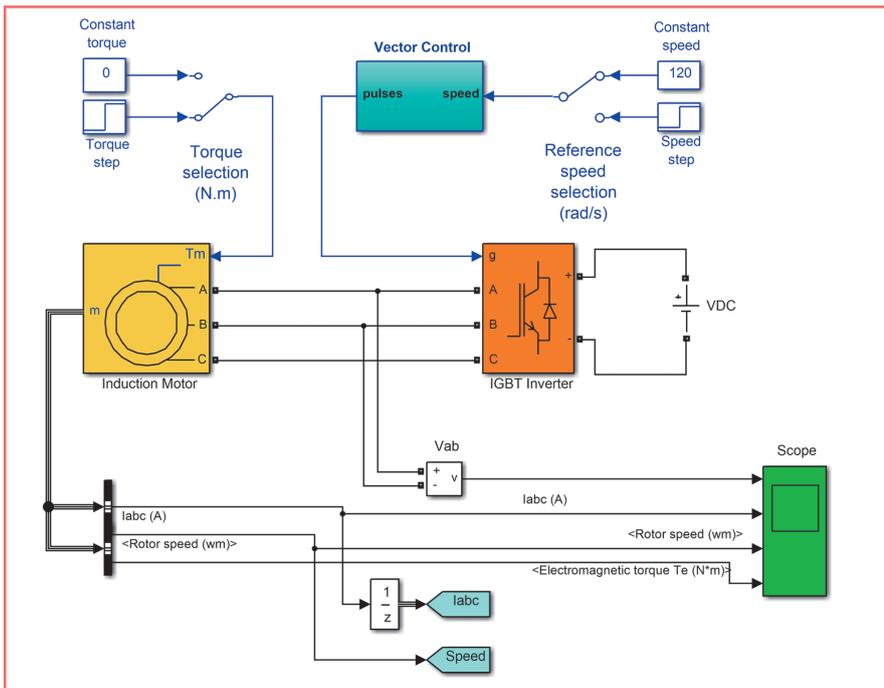


Рис. 1. Модель системы векторного управления асинхронным двигателем.

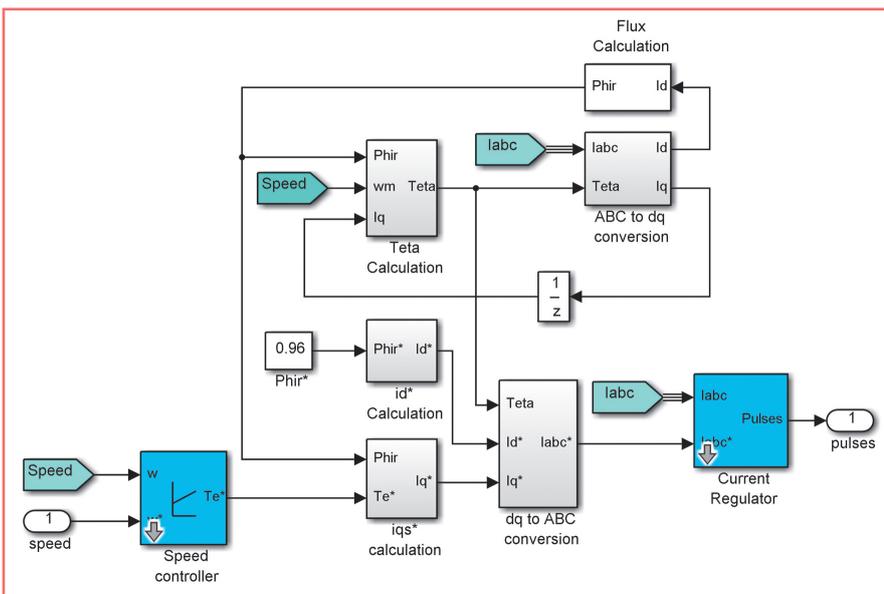


Рис. 2. Модель подсистемы Vector Control of AC Motor Drive векторного управления асинхронным двигателем



Рис. 3. Структура системы автоматического управления с простейшим нечетким регулятором П-типа.

подсистема TetaCalculation производит расчет угла teta между двумя системами координат – неподвижной и вращающейся; подсистема FluxCalculation

рассчитывает мгновенные значения потокосцепления ротора; подсистема регулятора тока CurrentRegulator осуществляет управление переключени-

ями ключами инвертора по принципу токового коридора.

В условиях работы электропривода с изменяющейся нагрузкой эффективно применение систем автоматического управления с применением регуляторов на основе нечеткой логики, для которых производится непрерывная перенастройка параметров на основе анализа изменения ошибки регулирования.

Нечеткие логические регуляторы (НЛР) систем управления получили в последние годы большое распространение во всем мире. Они оказались эффективным и достаточно простым инструментом для автоматизации многих практических задач. Нечеткие регуляторы основываются на теориях нечетких множеств и нечеткой логики, которые являются расширением классической теории множеств и классической логики. Нечеткий логический регулятор является экспертной системой, в которой знания представлены в виде базы правил.

На рис. 3 представлена структура системы автоматического управления с простейшим нечетким логическим регулятором П-типа. Этот регулятор, как и классический регулятор, в системе автоматического управления получает на вход ошибку регулирования $e = g - y$, а на выходе формирует управляющее воздействие u на объект управления, но, в отличие от классического, регулятор с нечеткой логикой способен реализовать нелинейную зависимость между входными и выходными величинами. Эта зависимость получила название управляющей кривой (рис. 4) или управляющей поверхности в случае более сложных регуляторов ПИ-, ПИД-типа, когда на вход регулятора поступает не только ошибка рассогласования, но и ее производная и интеграл.

Нечеткий логический регулятор состоит из нескольких блоков: нормализации N и денормализации DN сигналов на входе и на выходе регулятора, фаззификации F и дефаззификации DF , а также блоков базы правил и механизма нечеткого логического вывода.

Блок нормализации входного сигнала приводит его к диапазону $[-1, 1]$, а блок денормализации реализует обратную операцию, производя постобработку выходного сигнала регулятора. Блок фаззификации производит переход к нечеткости, то есть точные значения входных переменных преобразуются в значения лингвистических перемен-

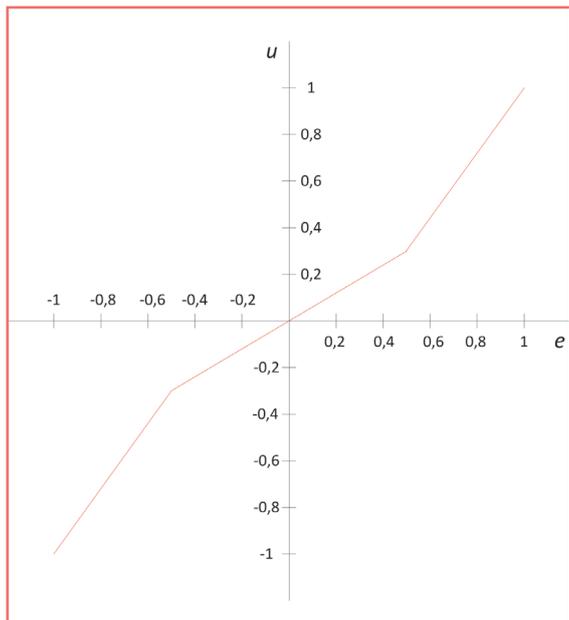


Рис. 4. Нелинейный закон управления НЛР.

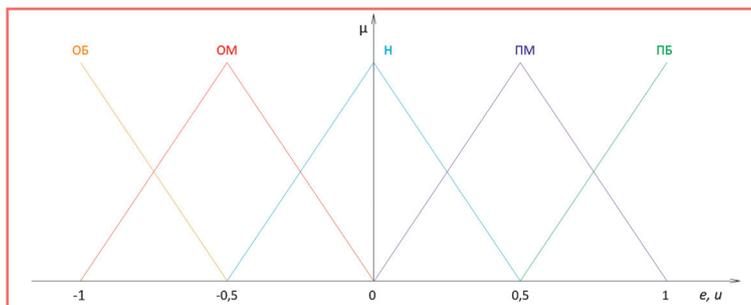


Рис. 5. Описание входа и выхода регулятора с помощью пяти термов.

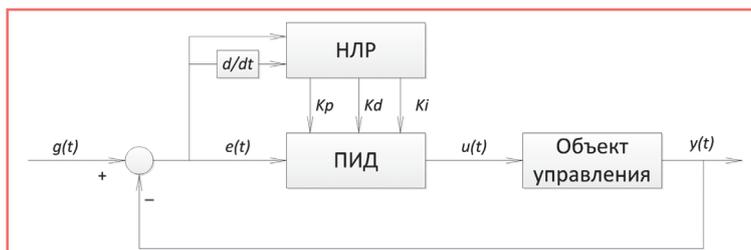


Рис. 6. Структурная схема нечеткого супервизора.

ных при помощи определенных функций принадлежности $\mu(e)$ (рис. 5). Каждая лингвистическая переменная (например, ошибка регулирования e) разбивается на несколько термов (например, отрицательная малая «ОМ», отрицательная большая «ОБ», нулевая «Н», положительная малая «ПМ» и положительная большая «ПБ»). Изменением положения термов достигается нелинейность зависимости между входными и выходными переменными регулятора. Термы также могут иметь различную форму.

После фаззификации выполняется процедура логического вывода в базе правил, в результате чего получается нечеткая выходная переменная, которая после операции дефаззификации превращается в «четкий» сигнал управления. База правил составляется на основе экспертных знаний о поведении системы и состоит из отдельных правил следующих видов:

- ЕСЛИ (e есть «Н»), ТО (u есть «Н») – пример для нечеткого регулятора П-типа;
- ЕСЛИ (e есть «ПБ») И (de/dt есть «Н») И (de/dt есть «Н»), ТО (u есть «ПБ») – пример для нечеткого регулятора ПИД-типа.

В роли выходной переменной нечеткого логического регулятора могут выступать коэффициенты регулирования классического ПИД-регулятора. В этом случае получается структура так называемого нечеткого супервизора, показанная на рис. 6. Идея нечеткого супервизора заключается в организации двухуровневой системы, в которой

на нижнем уровне располагается классический ПИД-регулятор, а на верхнем уровне – нечеткий. Нечеткий логический регулятор автоматически изменяет коэффициенты ПИД-регулятора на различных этапах переходного процесса.

Именно такой нечеткий супервизор предлагается применить для совершенствования вспомогательного асинхронного привода электроподвижного состава.

В рассмотренной модели системы управления асинхронным тяговым двигателем (рис. 1 и рис. 2) производится замена обычного регулятора скорости Speedcontroller на нечеткий. Модель регулятора в программе Simulink показана на рис. 7. Блок Fuzzy Logic Controller представляет собой основу нечеткого логического регулятора. На его вход подаются два сигнала: сигнал рассогласо-

вания по скорости и его производная, а на выходе формируются три сигнала, которые представляют собой коэффициенты усиления ПИД-регулятора.

Все параметры нечеткого логического регулятора задаются при помощи интерфейса FIS editor, представленного на рис. 8.

В меню Edit можно добавить или удалить входные или выходные переменные, участвующие в нечетких правилах. Для описания входных и выходных логических переменных, ввода правил и исследования поведения нечеткой логической системы FIS editor вызывает отдельные интерфейсы, доступ к которым возможен отдельными командами.

Меню View интерфейса FIS editor позволяет решить две задачи:

- с помощью пункта Rules просмотреть работу системы нечеткого логи-

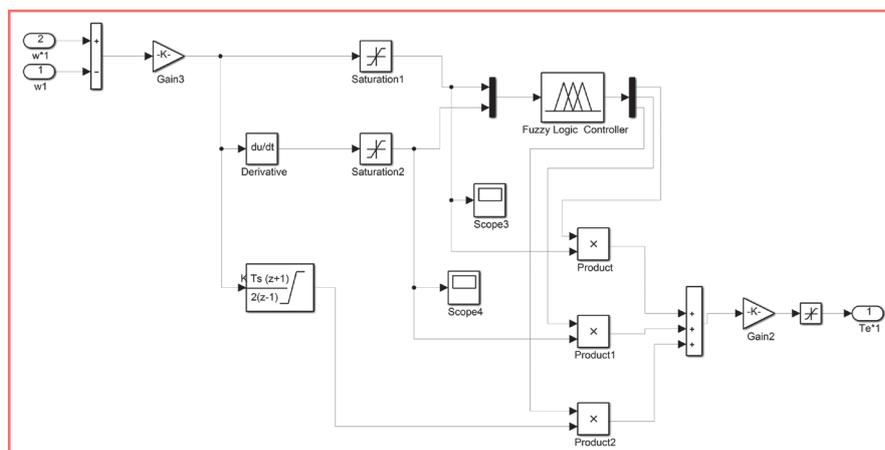


Рис. 7. Реализация нечеткого супервизора в среде MatLab Simulink.

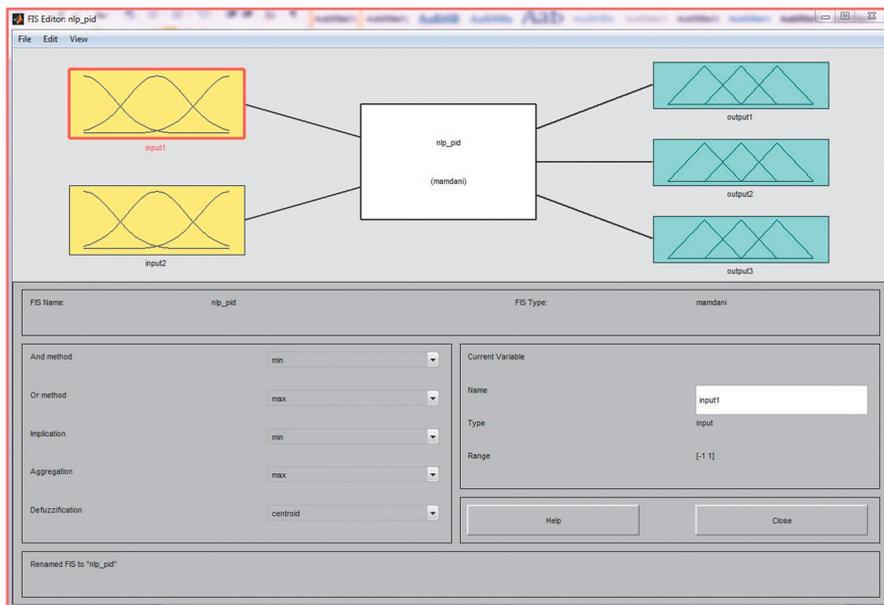


Рис. 8. Интерфейс FIS editor.

ческого вывода при различных входных данных;

- с помощью пункта Surface просмотреть управляющую поверхность нечеткой логической системы, которая получается при подаче на вход системы всевозможных допустимых значений.

Результаты моделирования системы с обычным регулятором, представлен-

ной на рис. 1, 2, и с предлагаемым нечетким логическим регулятором показаны на рис. 9а и 9б соответственно. Из рисунков видно, что при ступенчатом изменении момента сопротивления на валу двигателя в первом случае происходит длительный переходный процесс по стабилизации электромагнитного момента, а во втором случае система

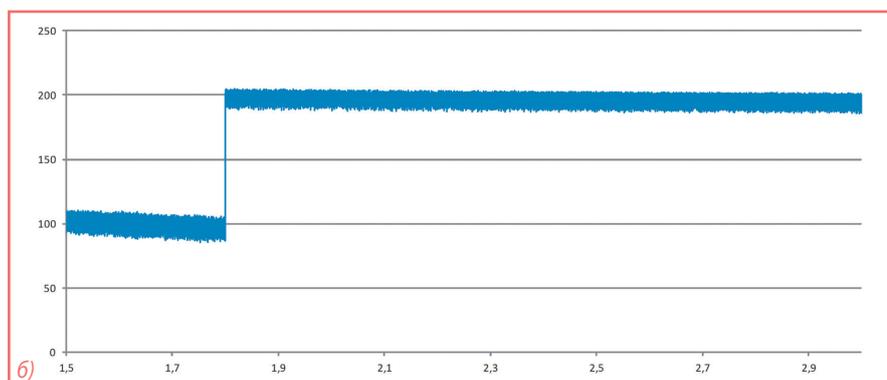
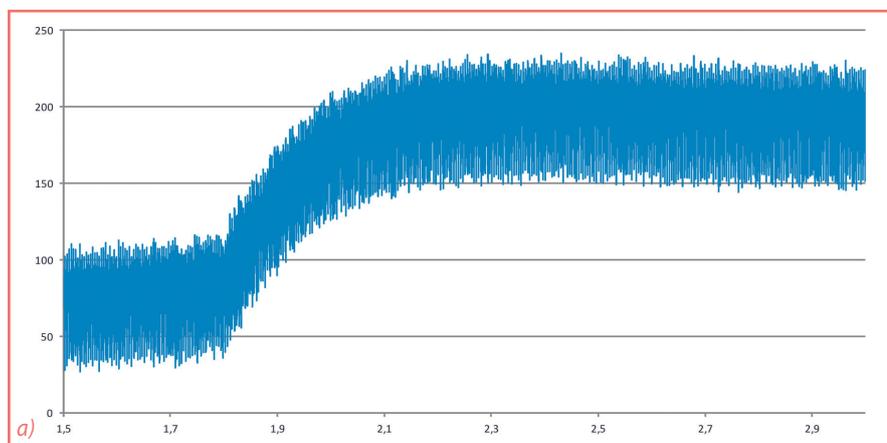


Рис. 9. Процесс отработки ступенчатого изменения момента нагрузки системой управления с обычным (а) и нечетким логическим (б) регулятором.

управления практически мгновенно реагирует на изменение момента. Также видно, что уменьшаются пульсации электромагнитного момента в установленном режиме.

Заключение

Применение частотного регулирования асинхронного двигателя вспомогательного электропривода электроподвижного состава позволяет улучшить его энергетические и эксплуатационные показатели за счет стабилизации режимов работы.

Использование регуляторов на основе нечеткой логики, в которых производится непрерывная перенастройка параметров на основе анализа изменения ошибки регулирования, является основой совершенствования системы автоматического регулирования электропривода, работающего в условиях постоянно меняющейся нагрузки.

Применение в системе автоматического управления нечеткого логического регулятора позволит значительно уменьшить динамические ошибки регулирования при ступенчатых изменениях нагрузки электропривода.

Литература

1. Евстафьев А.М., Якушев А.Я. Современные системы управления вспомогательным электроприводом локомотива – М: Электроника и электрооборудование транспорта – 2014, № 5 – с. 38–41.
2. Бураков М.В. Нечеткие регуляторы // Учебное пособие – СПб: ГУАП, 2010. – 237 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием // М: Академия, 2006. – 272 с.

Плак Алексей Владимирович

Родился в 1928 году. Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ) по специальности «Инженер путей сообщения, электромеханик». Доктор технических наук, профессор. Опыт работы – 60 лет. В настоящее время работает профессором в Петербургском государственном университете путей сообщения (ПГУПС). Имеет более 100 научных трудов и авторских свидетельств. Награжден медалью «За оборону Ленинграда» и орденом «Знак почета».

Евстафьев Андрей Михайлович

Родился в 1979 году. Выпускник Петербургского государственного университета путей сообщения. Кандидат технических наук, доцент. В 2005 году защитил кандидатскую

диссертацию на тему «Электронные системы ослабления возбуждения тяговых двигателей электроподвижного состава». В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрическая тяга» ПГУПС. Автор более 100 печатных трудов и патентов.

Якушев Алексей Яковлевич

Родился в 1940 году. В 1964 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ) по специальности «Инженер путей сообщения, электромеханик». Кандидат технических наук, доцент. В 1970 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование способов улучшения работы систем вспомогательных машин электропоездов переменного тока». В настоящее время работает профессором в Петербургском государственном университете путей сообщения (ПГУПС). Имеет более 60 научных трудов, 3 авторских свидетельства.

Теличенко Станислав Алексеевич

Родился в 1989 году. В 2013 году окончил Петербургский государственный университет

путей сообщения по специальности «Электрический транспорт железных дорог», после окончания университета работает на кафедре «Электрическая тяга» и продолжает обучение в аспирантуре.

Plaks Alexey

Was born in 1928. He graduated from Leningrad Institute of Railway Engineers (LIRE) with specialization in «Railway engineer, electromechanician». He is a Doctor of Engineering Science, professor. His working experience is 60 years. At present he works as professor in St. Petersburg State Railway University (SPSRU). He has more than 100 scientific works and certificates of authorship. He was awarded by the medal «For defense of Leningrad» and order «Badge of Honor».

Yevstafyev Andrey

Was born in 1979. He graduated from Saint Petersburg State Railway University. He is a candidate of Engineering, an associate professor. In 2005 he defended a Ph.D. thesis, the theme is «Electronic systems of activation reduction of

electro movable vehicle's traction engine». At present he works as the head of «Electric traction» chair of PGUPS. He is an author of more than 100 printed works and patents.

Yakushev Alexey

Was born in 1940. In 1964 he graduated from Leningrad Institute of Railway Engineers (LIRE) with a degree in «Railway engineer, electrician». He is a candidate of Technical Sciences, assistant professor. In 1970 he defended the master's thesis on the topic «Researching of ways to improve work of auxiliary machines systems of electrical trains with alternative current». At the present time he works as a professor in St. Petersburg State Transport University (PSTU). He has more than 60 scientific works and 3 certificates of authorship.

Telichenko Stanislav

Was born in 1989. In 2013 graduated from the Petersburg State Transport University with degree in the «Railway electric transport», after graduation he works at the «Electric operation» department and undertakes the further academic postgraduate studies.

Комбинированное управление асинхронным двигателем с фазным ротором

// Combined control of an asynchronous motor with phase rotor //

Доманов В.И., к.т. н., Доманов А.В., к.т. н.,
Чугунов К.А.,
ФГБОУ ВПО «УлГТУ», г. Ульяновск

В статье рассматривается схема управления асинхронного двигателя, позволяющая получить новые характеристики в электроприводе. Обосновывается, что последовательное включение обмоток статора и ротора обеспечивает регулирование скорости асинхронного двигателя и улучшает энергоэффективность. Получено выражение механической характеристики для рассматриваемого электропривода. Проведен анализ чувствительности момента к варьируемым параметрам функции.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, фазный ротор, механическая характеристика, скольжение, схема управления, критический и пусковой моменты, скважность, ключ, чувствительность, энергоэффективность.

Асинхронный двигатель с фазным ротором (АДФР) широко используется в промышленности в различных схемах включения [1–4]: каскадные схемы, двигатели двойного питания, потенциал-регуляторы, электрический вал и др. Это объясняется конструктивными особенностями АДФР, которые позволяют использовать разнообразные схемы включения обмоток. В статье рассматривается схема, позволяющая получить новые характеристики в электроприводе с применением АДФР.

Известны схемы [1–4], в которых на обмотки статора и ротора подается напряжение питания. Если частоты подаваемых напряжений равны, то реализуется схема дифференциального сельсина. Если частоты напряжений различаются, то создается схема двигателя двойного питания. При последовательном включении обмоток статора и заторможенного ротора формируется схема потенциал-регулятора.

Considered the control circuit of the induction motor, which allows to receive new features in the electric drive. It is proved that the series connection of the stator windings and rotor enables speed control the induction motor and improves energy efficiency. An expression for the given mechanical characteristics of the drive. The analysis of the sensitivity of the moment to the variable parameters of the function.

Keywords: induction motor, phase rotor, mechanical characteristic, slip, control circuit, critical and starting moment, duty cycle, key, sensitivity, energy efficiency.

В предлагаемой схеме обмотки АДФР также соединены последовательно, но ротор не заторможен (рис. 1). В этом случае первоначально частоты полей статора и ротора равны, а сам

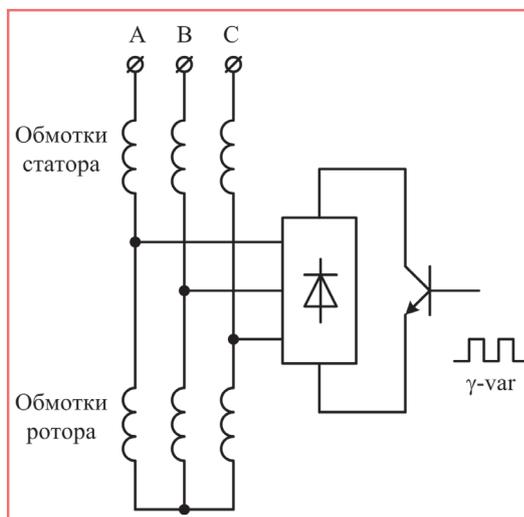


Рис. 1. Схема включения обмоток АДФР при комбинированном управлении.

ротор двигателя неподвижен и имеет определенную ориентацию по аналогии с дифференциальным сельсином. Если в схему включить выпрямительный мост, нагруженный на транзистор, работающий в ключевом режиме (рис. 1), то по обмоткам статора и ротора АДФР начнут протекать токи, величина которых будет зависеть от скважности γ коммутации ключа. При возрастании токов в обмотках произойдет перераспределение напряжений между статором и ротором. Это приведет к созданию момента, вращению ротора и снижению частоты вращения его поля. Регулирование скважности ключа позволяет изменять скорость вращения АДФР. В рассматриваемой схеме одним ключом регулируются токи статора и ротора, поэтому такое управление является комбинированным и объединяет два режима: регулирование скорости изменением напряжения на статоре и сопротивлением в цепи ротора.

Определим уравнение механической характеристики двигателя для этой схемы. Известна формула Клосса [3], позволяющая рассчитать механическую характеристику асинхронного двигателя:

$$M = \frac{2M_{KP}}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S}}, \quad (1)$$

где M – момент, развиваемый двигателем; M_{KP} – критический момент; S_{KP} – критическое скольжение; $S = \frac{n_0 - n}{n_0}$ – текущее скольжение; n_0 – скорость холостого хода; n – текущее значение скорости.

Величина определяется выражением [3]

$$M_{KP} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 X_K}, \quad (2)$$

где U_ϕ – напряжение, подаваемое на фазы статора; ω_0 – ча-

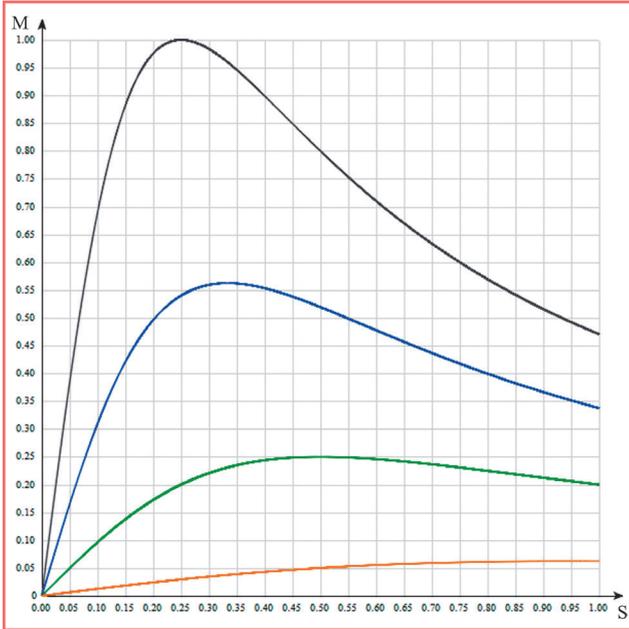


Рис. 2. Семейство механических характеристик АДФР для значений скважности: ● – 1; ● – 0,75; ● – 0,5; ● – 0,25.

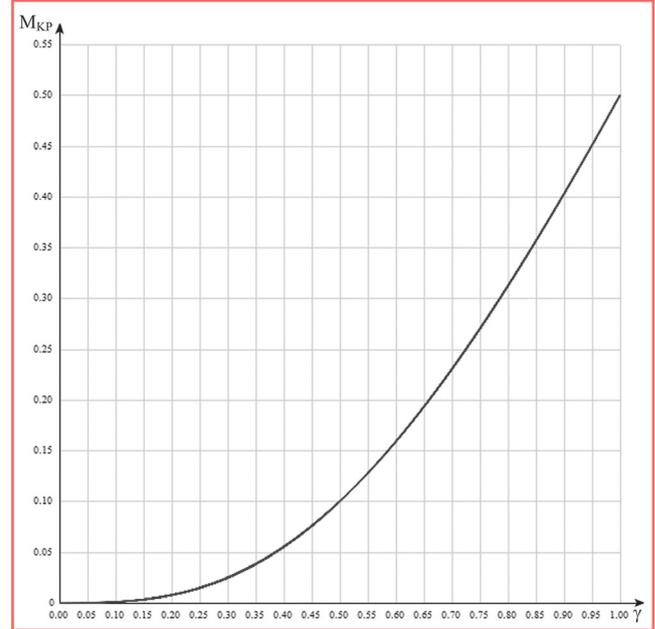


Рис. 3. График изменения в зависимости от скважности.

стота вращения поля статора; X_K – индуктивное сопротивление КЗ двигателя.

При изменении сопротивления роторной цепи критическое скольжение изменяется и находится по формуле [3]

$$S_{КРИ} = \frac{S_{КРЕ}(R_2 + R_{ДОБ})}{R_2} = S_{КРЕ} \left(1 + \frac{R_{ДОБ}}{R_2} \right), \quad (3)$$

где $S_{КРИ}$ – критическое скольжение для искусственной механической характеристики; $S_{КРЕ}$ – критическое скольжение для естественной механической характеристики; R_2 – сопротивление ротора; $R_{ДОБ}$ – добавочное сопротивление ротора.

При изменении скважности коммутации ключа изменяются значения U_ϕ и $R_{ДОБ}$. С некоторыми допущениями можно принять

$$U_{\phi И} = U_{\phi 0} \gamma$$

$$\text{и } R_{ДОБ} = R_2 \frac{1-\gamma}{\gamma}, \quad (4)$$

где $U_{\phi И}$ – напряжение, подаваемое на фазы статора при регулировании; $U_{\phi 0}$ – напряжение сети.

Подставляя формулы (2–4) в (1), получаем выражение, позволяющее построить семейство механических характеристик АДФР при изменении скважности коммутации ключа:

$$M = \frac{3(U_{\phi 0} \gamma)^2}{\left[\frac{S\gamma}{S_{КЕ}} + \frac{S_{КЕ}}{S\gamma} \right] \omega_0 X_K} \quad (5)$$

По формуле (5) построены графики, приведенные на рис. 2.

Уравнение (5) можно преобразовать к виду

$$M = \frac{K\gamma^2}{\frac{S\gamma}{S_{КЕ}} + \frac{S_{КЕ}}{S\gamma}}, \quad (6)$$

$$\text{где } K = \frac{3U_{\phi 0}}{\omega_0 X_K}.$$

Выражение для критического момента $M_{КР}$ получается при условии $S = S_{КЕ}$:

$$M_{КР} = \frac{K\gamma^2}{\gamma + \frac{1}{\gamma}} = \frac{K\gamma^3}{\gamma^2 + 1}. \quad (7)$$

На рис. 3 приведена зависимость $M_{КР} = f(\gamma)$.

Пусковой момент $M_{ПУСК}$ находится при условии $S = 1$:

$$M_{ПУСК} = \frac{K\gamma^2}{\frac{\gamma}{S_{КЕ}} + \frac{S_{КЕ}}{\gamma}} = \frac{K\gamma^3 S_{КЕ}}{\gamma^2 + S_{КЕ}^2}. \quad (8)$$

Оценим чувствительность $M_{ПУСК}$ к вариациям параметров γ и $S_{КЕ}$. Чувствительность функции $F(x, y, \dots, z)$ к варьируемому параметру x, y, \dots, z определяется выражением

$$S_F^x = \frac{dF}{dx} \frac{x}{F}. \quad (9)$$

Найдем чувствительности $S_{M_{ПУСК}}^\gamma$ и $S_{M_{ПУСК}}^{S_{КЕ}}$. В соответствии с формулами (8, 9) получаем

$$S_{M_{ПУСК}}^\gamma = 1 + \frac{2S_{КЕ}^2}{\gamma^2 + S_{КЕ}^2}, \quad (10)$$

$$S_{M_{ПУСК}}^\gamma = \frac{\gamma^2 - S_{КЕ}^2}{\gamma^2 + S_{КЕ}^2}. \quad (11)$$

Из выражений (10, 11) видно, что:

• $S_{M_{ПУСК}}^\gamma$ меняется в пределах от 1 до 2;

• $S_{M_{ПУСК}}^{S_{КЕ}} = 0$ при $\gamma = S_{КЕ}$. (12)

Анализ выражения (8) позволяет определить условия, при которых становится максимальным для конкретного значения $S_{КЕ}$.

При условии (12) $\frac{dM_{ПУСК}}{dS_{КЕ}} = 0$.

В соответствии с выражениями (8, 12) получаем

$$M_{ПУСКМАХ} = \frac{K\gamma^2}{2}.$$

Рассмотрим вопросы энергоэффективности предлагаемого электропривода. При $U_{ЗАД} = 0$ и $M_{СОПР} \approx 0$ в АДФР с комбинированным управлением $n = 0$, а в схеме с изменением сопротивления в роторной цепи $n \approx n_0$.

В первом случае то, потребляемый из сети, последовательно протекает по цепям статора и ротора, а во втором – только по цепям статора. В соответствии с этим будут различаться и мощности потерь холостого хода.

При регулировании скорости потери в таких схемах приближенно можно оценить по выражению

$$\Delta P = S_{КР} M_{КР}.$$

В первом случае с ростом $S_{КР}$ снижается $M_{КР}$, во втором – $M_{КР}$ сохраняется постоянным. На основании характери-

стик предлагаемого электропривода можно сделать вывод о его более высокой энергоэффективности.

Сравнивая полученные механические характеристики с известными для управления АД изменением напряжения статора или изменением сопротивления ротора [5, 6], можно сделать следующие выводы:

- полученные механические характеристики являются промежуточными между указанными выше;
- в процессе регулирования меняется жесткость характеристики как при регулировании изменением сопротивления ротора;
- в то же время при регулировании происходит изменение критического момента как при регулировании изменением напряжения, подаваемого на статор;
- предложенный способ регулирования АДФР сохраняет возможность создания каскадной схемы и позволяет повысить энергоэффективность электропривода.

Литература

1. Волков Н.И. Электромашинные устройства автоматики / Н.И. Волков, В.П. Милвзоров. – М.: Высш. шк., 1986. – 335 с.
2. Шенфельд Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шенфельд, Э. Хабигер. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.
3. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
4. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-2 Электроприводы / под ред. Л.Б. Масандилова. – М.: Машиностроение, 2012. – 520 с.
5. Доманов В.И. Регулирование асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре / В.И. Доманов, А.В. Доманов, И.Ю. Муллин, А.О. Холявко // Электроника и электрооборудование транспорта, 2013, № 2. – с. 35–37.
6. Доманов В.И. Силовые элементы автоматики / В.И. Доманов, А.В. Доманов. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 142 с.

Доманов Виктор Иванович

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

Доманов Андрей Викторович

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Ульяновский государственный технический университет по специальности «Измерительно-вычислительные комплексы и системы». В 2002 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка и исследование электроусилителя рулевого управления легковых автомобилей на основе бесконтактных двигателей». Кандидат технических наук, доцент, директор Экспертно-аналитического центра НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Имеет 107 научных трудов, автор 11 изобретений.

Чугунов Кирилл Алексеевич

Родился в 1991 году. В 2015 году окончил Ульяновский государственный технический

университет. Аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет публикации в области электро-механики.

Domanov Viktor

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

Domanov Andrey

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

Chugunov Kirill

Was born in 1991. In 2015 he graduated from Ulyanovsk State Technical University. Post-graduate of Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has published articles in the field of electrical engineering.

Мезаэпитаксиальные GaAs-варикапы для ВЧ-аппаратуры

// Mesaepitaxial GaAs-varactor diodes for a high-frequency equipments //

Сурайкин А.И., к.т. н.,
Мордовский национальный исследовательский
университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск

В статье приводятся результаты разработки и исследования полупроводниковых, мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов для широкого применения в высокочастотной аппаратуре. Приводятся общие технические требования к GaAs-варикапам, а также основные электрические параметры и характеристики экспериментальных образцов мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов. Ключевые слова: арсенид галлия, варикап, мезаэпитаксиальная структура, емкость, добротность, коэффициент перекрытия по емкости.

The article provides results of design and research semiconductor, mesaepitaxial GaAs-varactor diodes for a consumer application in high-frequency equipments. Provides total technical features for GaAs-varactor diodes and purpose electrical characteristics of experimental mesaepitaxial GaAs-varactor diodes.

Keywords: gallium arsenide, varactor diode, mesaepitaxial conformation, capacitance, factor of overlap capacitance.

Расширение области применения GaAs-приборов в телекоммуникационном оборудовании, в том числе высокочастотных диапазонов, обусловлено тем, что в области высоких частот GaAs имеет лучшие электрические характеристики по сравнению с кремнием.

В этой связи разработка и серийный выпуск GaAs-варикапов являются достаточно актуальными и перспективными задачами наряду с другими полупроводниковыми приборами, применяющимися в ВЧ-аппаратуре. Это, в свою очередь, обеспечивает дальнейшее развитие современной электронной компонентной базы (ЭКБ).

Применение GaAs для производства варикапов актуально еще и тем, что он в некотором смысле отвечает приближению идеального полупроводника для варикапов. Идеальный полупроводник для варикапа должен иметь те или иные носители заряда с высокой подвижностью, обладать низкой диэлектрической проницаемостью, широкой запрещенной зоной, низкой энергией ионизации примесей и высокой теплопроводностью. Эти параметры обеспечивают минимальное сопротивление, минимальную емкость, небольшой ток

насыщения, а также возможность работы при повышенных температурах.

За рубежом и на ряде российских предприятий имеется технология производства многослойных эпитаксиальных GaAs-структур. На сегодняшний день на основе таких структур разработаны быстродействующие высоковольтные р-і-п-диоды для преобразовательной и импульсной техники [1]. Применение технологии производства быстродействующих высоковольтных р-і-п-диодов для изготовления мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов позволяет создать необходимые предпосылки для разработки высокодобротных варикапов с широким диапазоном рабочего напряжения.

Постановка задачи

Использование в GaAs-диодных структурах зависимости барьерной емкости от приложенного обратного напряжения, с последующим нормированием этой зависимости, позволяет реализовать такой полупроводниковый прибор, как варикап. Характер этой зависимости, то есть вольт-фарадной характеристики (ВФХ), определяется видом распределения концентрации примесей в области объемного заряда

р-п-перехода и, соответственно, методом его изготовления. Эти зависимости получены аналитически и достаточно известны как для резких р-п-переходов, так и для плавных р-п-переходов [2]. В данной работе сделана попытка получения варикапа на основе технологии формирования мезаэпитаксиальных диодных структур с резким р-п-переходом.

Основные требования к мезаэпитаксиальным GaAs-варикапам для ВЧ-аппаратуры кратко можно представить в следующем виде:

- емкость варикапа при обратном напряжении – $U_R = 4$ В: 220÷280 пФ (первый вариант исполнения – одиночные кристаллы), 55÷80 пФ (второй вариант исполнения – два варикапа на одном кристалле);
- добротность варикапа при обратном напряжении – $U_R = 4$ В: не менее 200 (первый вариант исполнения – одиночные кристаллы), не менее 120 (второй вариант исполнения – два варикапа на одном кристалле);
- коэффициент перекрытия по емкости варикапа (отношение емкости варикапа при $U_R = 4$ В к емкости варикапа при $U_R = 100$ В) – не менее 3,5;
- постоянный обратный ток варикапа при $U_R = 100$ В в рабочем диапазоне температур – не более 1 мкА;
- рабочий диапазон температуры окружающей среды – от – 60 до + 85°С.

Теория

Структура кристалла мезаэпитаксиального GaAs-варикапа приведена на рис. 1.

Структура, приведенная на рис. 1, формируется методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Полученные эпитаксиальные р⁺-п⁺-п⁺-структуры имеют несколько металлургических переходов внутри структуры [3].

Физическая структура и распределение концентрации в р⁺-п⁺-п⁺-структуре кристалла варикапа приведены на

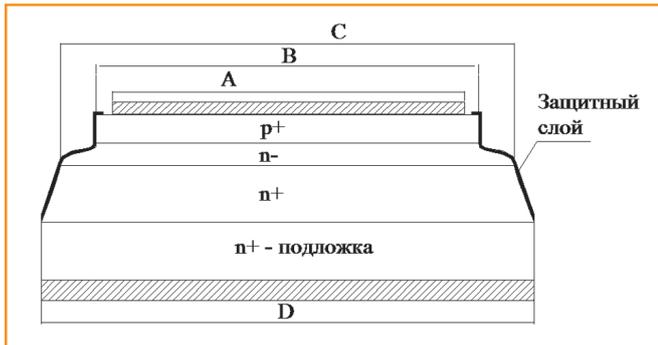


Рис. 1. Структура кристалла GaAs-варикапа: А – контакт анода, В – анодная область (p⁺), С – высокоомная n – область, D – катод; в качестве защитного слоя могут использоваться диэлектрические пленки SiO₂ и Si₃N₄, а также полимерные материалы типа фотолитографических резистов.

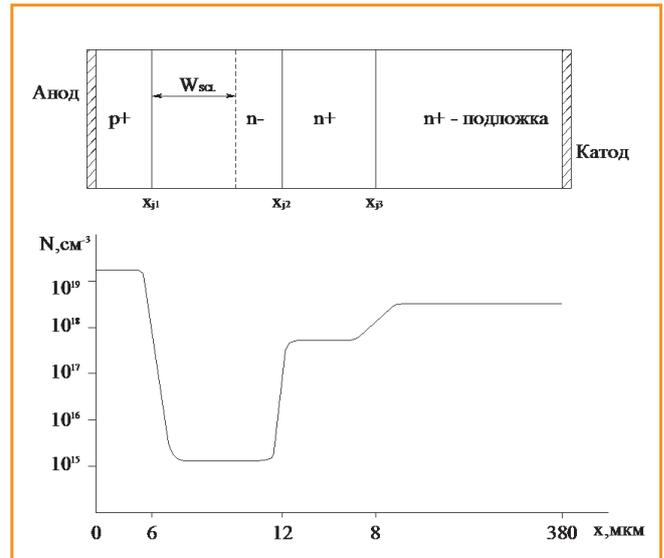


Рис. 2. Физическая структура и распределение концентрации носителей заряда в структуре GaAs-варикапа (W_{SCL} – область пространственного заряда в высокоомном эпитаксиальном слое).

рис. 2. Если принимать в расчет общую протяженность эпитаксиальных областей и подложки GaAs-варикапа такой, как показано на рис. 2, то на переходах x_{ж1}, x_{ж2}, x_{ж3} возникают диффузионные потенциалы, сумма которых дает полное диффузионное напряжение такое же, как и на GaAs p-i-n-диоде при T = 300 К [1, 2]:

$$U_{VD} = U_{xj1} + U_{xj2} + U_{xj3} \leq 1,2BЭ. \quad (1)$$

Так как варикап представляет собой, прежде всего, диодную структуру, то практически все параметры, включая присущие непосредственно варикапам, определяются удельным сопротивлением и толщиной высокоомного эпитаксиального слоя. В этом факте содержится как положительный момент (весь расчет варикапа мы можем свести к расчету параметров высокоомного эпитаксиального слоя), так и небольшой минус: неконтролируемое изменение параметров высокоомной эпитаксиальной пленки, а также параметры всех остальных эпитаксиальных слоев, включая паразитные сопротивления металлических контактов, приводят к заметному разбросу ряда электрических параметров, таких как емкость, добротность.

Поэтому в конечном итоге только исследование экспериментальных образцов варикапов с последующей нормировкой значений электрических параметров позволяет оптимизировать структуру кристалла варикапа.

Используя формулу плоского конденсатора для структуры, приведенной на рис. 2, можно записать

$$C_{VD} = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S_{pn}}{W_{SCL} (U_R)}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость GaAs;

ϵ_0 – электрическая постоянная;

S_{pn} – площадь p-n-перехода варикапа;

W_{SCL} – ширина области пространственного заряда высокоомного эпитаксиального слоя (базы), зависящая от приложенного обратного напряжения – U_R .

Учитывая, что разрабатываемые варикапы на основе GaAs выполнены полностью по эпитаксиальной технологии с разностью концентраций в несколько порядков, то вполне приемлемо приближение «резкого» асимметричного p-n-перехода. Для такого перехода, в приближении обеднения (при обратных напряжениях), емкость можно аппроксимировать следующим соотношением [4]:

$$C_{VD} = S_{pn} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot N_D}{2 \cdot (U_{pn}^* + U_R)}}, \quad (3)$$

где N_D – концентрация донорной примеси в базовой области варикапа (высокоомном эпитаксиальном слое);

U_{pn}^* – контактная разность потенциалов p-n-перехода варикапа.

Принимая во внимание то, что емкость варикапов (C_{VD}) и диапазон обратных напряжений (U_R), как правило, оговариваются в исходных технических требованиях, а контактную разность потенциалов – U_{pn}^* – можно вычислить в соответствии с (1), на основании (3) можно определить в первом приближении площадь варикапов при уровне легирования базовой области $(1 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$:

$$S_{pn} = C_{VD} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (U_{pn}^* + U_R)}{q \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot N_D}}. \quad (4)$$

Использование соотношения (4) при разработке варикапов удобно тем, что одну и ту же структуру мы можем использовать для изготовления двух типов варикапов:

- при обратном напряжении $U_R = 4 \text{ В}$ и емкости $C_{VD} = 250 \text{ пФ}$ мы получим значение площади p-n – для первого варианта исполнения варикапа – $S_{pn} \approx 5,5 \text{ мм}^2$;

- при обратном напряжении $U_R = 4 \text{ В}$ и емкости $C_{VD} = 68 \text{ пФ}$ мы получим значение площади p-n – для второго варианта исполнения варикапа – $S_{pn} \approx 1,6 \text{ мм}^2$.

Толщину высокоомного эпитаксиального (базового) слоя $h_{B \text{ epi}}$ выберем, исходя из условия, что данная величина должна быть больше ширины области пространственного заряда (ОПЗ) $W_{SCL \text{ max}}$ при максимальном обратном напряжении $U_{R \text{ max}}$ (5)

$$h_{B \text{ epi}} > W_{SCL \text{ max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot (U_{pn}^* + U_{R \text{ max}})}{q \cdot N_D}}. \quad (5)$$

Согласно (5), при $U_{R \text{ max}} = 100 \text{ В}$, получим $W_{SCL \text{ max}} \approx 12 \text{ мкм}$.

Таким образом, на основании полученных данных выбор толщины высокоомного эпитаксиального (базового) слоя $h_{B \text{ epi}} > 12 \text{ мкм}$ вполне приемлем.

Все вышеприведенные параметры – концентрация донорной примеси в базовой области варикапа, толщина эпитаксиального слоя базовой области варикапа – непосредственно связаны с величиной добротности (6)

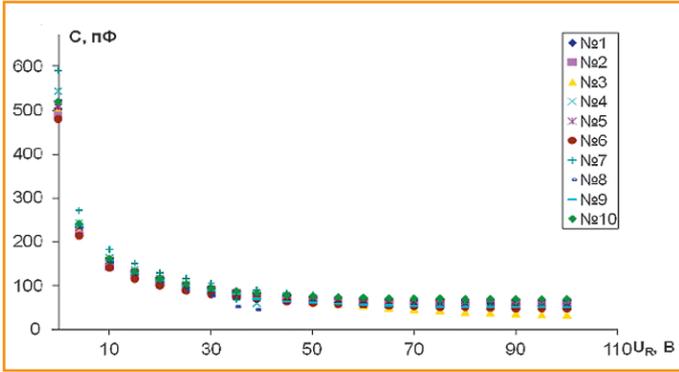


Рис. 3. ВФХ 10 шт. экспериментальных образцов GaAs-варикапов первого типа (одиночные кристаллы) при $T = 300\text{ K}$.

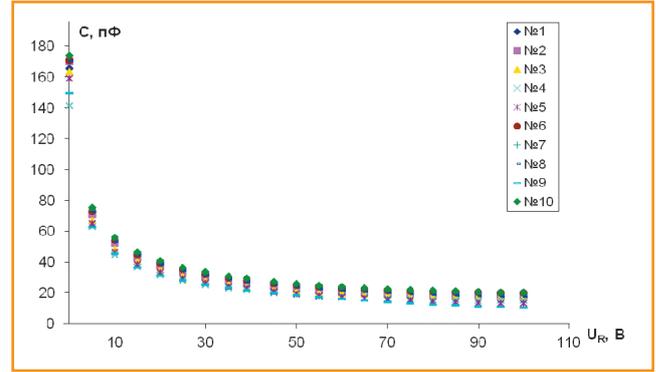


Рис. 4. ВФХ 10 шт. экспериментальных образцов GaAs-варикапов второго типа (два варикапа на одном кристалле) при $T = 300\text{ K}$.

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{VD} \cdot R_{VD}}, \quad (6)$$

где C_{VD} – общая емкость варикапа при некотором заданном обратном напряжении U_R ;

$f = 50\text{ МГц}$ – частота переменного напряжения, на которой осуществляется измерение добротности при некотором заданном обратном напряжении U_R ;

R_{VD} – общее активное сопротивление структуры варикапа, с приемлемой точностью можно принять равным сопротивлению базовой области варикапа (сопротивлением контактов и высоколегированных областей можно пренебречь).

С учетом вышесказанного, общее активное сопротивление структуры варикапа [5]

$$R_{VD} \approx R_B = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot N_D^-} \cdot \frac{W_B}{S_{pn}} = \rho_B \cdot \frac{W_B}{S_{pn}}, \quad (7)$$

где $\rho_B = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot N_D^-}$ – удельное сопротивление базовой области варикапа;

S_{pn} – площадь p - n -перехода варикапа

W_B – толщина квазинейтральной области базы варикапа.

Толщину квазинейтральной области базы варикапа можно вычислить следующим образом (рис. 2):

$$W_B = h_{Bepi} - W_{SCL} = x_{j2} - x_{j1} - W_{SCL}, \quad (8)$$

где h_{Bepi} – толщина эпитаксиального слоя базовой области;

W_{SCL} – ширина ОПЗ в базовой области варикапа.

Соотношение (7) показывает преимущества применения полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей заряда для изготовления варикапов. В данном случае применение GaAs для изготовления варикапов со структурой, приведенной на рис. 1, обеспечивает подвижность электронов в базовой области – $m_n \approx 5000\text{ см}^2/\text{В.с}$ (для сравнения, в кремнии – $m_n \approx 1420\text{ см}^2/\text{В.с}$). Это обеспечивает более низкие по сравнению с Si значения полного активного сопротивления варикапов и, как следствие, на основании (6), более высокие значения добротности GaAs-варикапов.

Следует отметить, что и при расчете, и при измерении толщины и удельного сопротивления базового слоя варикапа имеет место существенная погрешность. Поэтому на практике чаще всего сопротивление R_{VD} устанавливают экспериментальным путем на основе измерения динамического сопротивления прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) варикапа.

Результаты исследования экспериментальных GaAs-варикапов

После сборки экспериментальных образцов GaAs-варикапов (корпус типа ТО-251) было проведено исследование их ВАХ и ВФХ. Также было проведено измерение добротности.

ВФХ 10 шт. экспериментальных образцов варикапов первого типа (одиночные кристаллы) при $T = 300\text{ K}$ приведены на рис. 3.

Исследуя рис. 3, можно отметить, что линейность ВФХ наблюдается практически во всем рабочем диапазоне об-

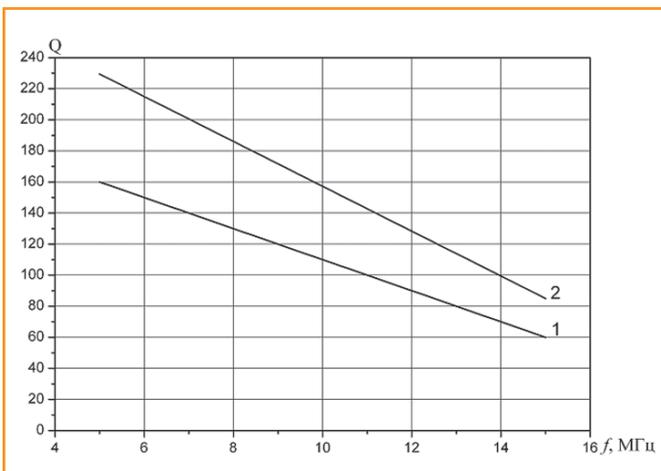


Рис. 5. Аппроксимированная зависимость добротности варикапов первого типа от частоты (1 – варикапы со средней емкостью 350 пФ, 2 – варикапы со средней емкостью 250 пФ).

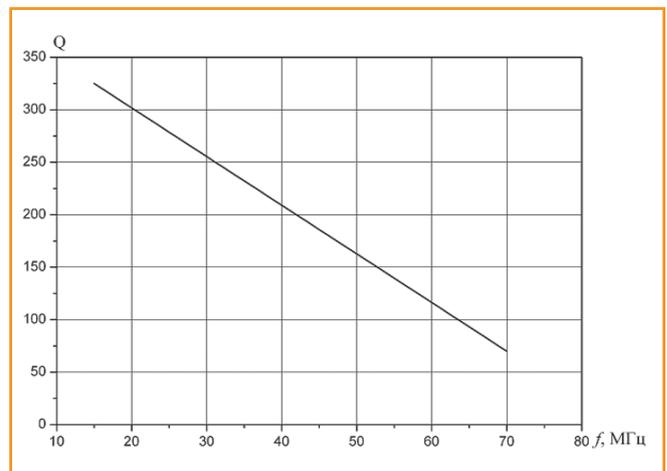


Рис. 6. Аппроксимированная зависимость добротности варикапов второго типа от частоты (среднее значение емкости – 68 пФ).

ратных напряжений, начиная от 4 В и до 100 В. Лишь на участке менее 4 В наблюдается резкое возрастание емкости, но это не регламентированный для работы интервал обратных напряжений.

ВФХ 10 шт. экспериментальных образцов варикапов второго типа (сдвоенные кристаллы) при $T = 300\text{ K}$ приведены на рис. 4.

Рис. 4 показывает результат, аналогичный предыдущему (рис. 3) с точки зрения линейности характеристики. Отличие в том, что величина емкости данного варикапа ниже, чем у предыдущего варианта (измерения проводились на одном, произвольно выбранном варикапе).

Измерение добротности варикапов, а также зависимости добротности от частоты проводилось измерителем добротности Е 4–11. Результаты измерения приведены на рис. 5 и 6.

Выводы

В проведенной работе выполнен расчет физической структуры мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов двух типов: однокристалльный вариант и вариант с двумя варикапами на одном кристалле. Изготовлены экспериментальные образцы мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов, проведены исследования их электрических параметров и характеристик.

В результате исследования электрических характеристик мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов, включая ВАХ и ВФХ, установлено, что полученные

зависимости позволяют использовать их наряду с кремниевыми варикапами в радиотехнической аппаратуре общепромышленного применения. Более широкий диапазон рабочих напряжений мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов позволяет применять их более широко, включая высоковольтную аппаратуру. Полученные значения добротности варикапов, величины которых превосходят добротности аналогичных кремниевых варикапов, обеспечивают возможность применения мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов в ВЧ- и СВЧ-аппаратуре.

Литература

1. Сурайкин А.И. Быстродействующие высоковольтные GaAs-диоды для преобразовательной техники и импульсных устройств // Электроника и электрооборудование транспорта. № 2, 2015 – с. 35–37.
2. Сурайкин А.И., Федотов Е.Н. Быстродействующие, высоковольтные GaAs диоды для силовой электроники // Электронное периодическое издание «Огарев-online», Технические науки, вып. 22. Режим доступа: http://appmath.mrsu.ru/ogarev_onlain
3. Арсенид галлия. Получение, свойства, применение / Под ред. Кесаманлы Ф.П., Наследова Д.Н. – М.: Наука, 1973. С. 36–47.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 книгах. Кн. 1. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. С. 80–88.
5. Уотсон Г. СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Г. Уотсона. – М.: Мир, 1972. С. 174–303.

Сурайкин Александр Иванович

Родился в 1963 году. В 1985 году окончил Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва по специальности «Полупроводники и диэлектрики». Кандидат технических наук. В 1998 году защитил диссертацию по теме «СБИС видеопроцессора для приемников телевизионных сигналов». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает начальником КБ полупроводниковой электроники ООО «Инвентор», доцентом кафедры электроники и нанoeлектроники Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Имеет 55 научных трудов, 8 патентов, из них 4 свидетельства об официальной регистрации топологий ИМС.

Suraikin Alexander

Was born in 1963. In 1985 he graduated from Mordovskiy State University named after N.P. Ogaryev with specialization in «Semiconductors and dielectrics». He is a candidate of Engineering Sciences. In 1998 he defended a thesis on the subject «VLCI of video-processor for receiving devises of TV signals». His work experience is 29 years. At present he works as head of KB semiconductor electronics in «Inventor» LLC, associate professor at the electronics and nanoelectronics department in Mordovskiy State University named after N.P. Ogaryev. He has 55 scientific publications, 8 patents including 4 certificates about official registration of IC topology.

О контроле и надзоре в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского назначения, созданных за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета

Вступил в действие Административный регламент исполнения Федеральной службой по интеллектуальной собственности государственной функции по осуществлению контроля и надзора в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского назначения, созданных за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета, а также контроля и надзора в установленной сфере деятельности в отношении государственных заказчиков и организаций-исполнителей государственных контрактов, предусматривающих проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

Предметом контроля (надзора) является соблюдение государственными заказчиками и организациями-исполнителями государственных контрактов требований, установленных законодательством Российской Федерации в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского назначения, созданных за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета, в том числе за счет субсидий.

Выполнение государственной функции по проведению контроля (надзора) возложено на Роспатент и осуществляется на безвозмездной основе.

Регламентом определены полномочия должностных лиц Роспатента, осуществляющего государственный контроль, и лиц, в отношении которых осуществляются мероприятия по контролю (надзору).

Срок проведения как плановой, так и внеплановой проверок не может превышать двадцати рабочих дней.

Периодичность осуществления плановых проверок устанавливается руководителем Роспатента.

Основаниями для проведения внеплановой проверки являются:

- истечение срока исполнения заказчиком, исполнителем ранее выданного предписания Роспатента об устранении выявленного нарушения;

- поступление обращений и заявлений граждан, в том числе индивидуальных предпринимателей, юридических лиц, информации от органов государственной власти, органов местного самоуправления, из средств массовой информации о фактах причинения вреда безопасности государства или угрозы его возникновения;

- приказ руководителя Роспатента, изданный в соответствии с поручениями Президента Российской Федерации, Правительства Российской Федерации, Минэкономразвития России либо требованием прокурора о проведении внеплановой проверки в рамках надзора за исполнением законов по поступившим в органы прокуратуры материалам и обращениям.

Исполнение государственной функции включает в себя выполнение следующих административных процедур:

- 1) формирование ежегодного плана проведения плановых проверок;

- 2) подготовка к проведению плановой проверки;

- 3) подготовка к проведению внеплановой проверки;

- 4) проведение проверки и оформление ее результатов;

- 5) меры, принимаемые в отношении фактов нарушений, выявленных при проведении проверки.

Проверки (плановые и внеплановые) проводятся в форме выездных проверок по месту нахождения и (или) по месту фактического осуществления деятельности заказчика, исполнителя.

В ходе проверки подлежат рассмотрению:

- 1) государственные контракты, в том числе прилагаемая к ним документация, касающаяся предмета проверки;

- 2) договоры, финансирование которых осуществляется за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета, в том числе за счет субсидий, включая прилагаемую к ним документацию, касающуюся предмета проверки;

- 3) акты сдачи-приемки научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ;

- 4) отчеты о научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работах;

- 5) отчеты о проведении патентных исследований;

- 6) материалы заявок на выдачу охраняемых документов (патентов, свидетельств);

- 7) официально опубликованные заявки и патенты (описания к патентам);

- 8) приказы (распоряжения) об отнесении информации о результатах интеллектуальной деятельности к коммерческой (служебной) тайне;

- 9) документы государственного учета результатов интеллектуальной деятельности;

- 10) инвентаризационные описи, ведомости, акты инвентаризации, передаточные акты, касающиеся результатов интеллектуальной деятельности;

- 11) договоры об отчуждении исключительного права на результаты интеллектуальной деятельности;

- 12) лицензионные договоры о предоставлении права использования результатов интеллектуальной деятельности;

- 13) документы, касающиеся использования (внедрения) результатов интеллектуальной деятельности;

- 14) документы бухгалтерского учета прав на результаты интеллектуальной деятельности;

- 15) формы статистического наблюдения, касающиеся результатов интеллектуальной деятельности;

- 16) отчеты об оценке стоимости исключительного права на результаты интеллектуальной деятельности;

17) договоры о международном научно-техническом сотрудничестве;

18) иные необходимые для рассмотрения в ходе проведения проверки документы, относящиеся к предмету проверки.

По результатам проверки может быть выдано предписание об устранении выявленных нарушений, возбуждено дело об административном правонарушении, а также направлены информация о нарушении законодательства Рос-

сийской Федерации и материалы проверки в правоохранительные органы Российской Федерации, Счетную палату Российской Федерации, Федеральную службу финансово-бюджетного надзора и иные органы государственной власти Российской Федерации.

Действия (бездействие) и решения, принятые в ходе исполнения государственной функции должностными лицами Роспатента, могут быть обжалованы в судебном порядке путем обращения к ру-

ководству Роспатента или в Министерство экономического развития Российской Федерации. Срок рассмотрения жалобы не должен превышать тридцати дней.

Приказ Роспатента от 29.05.2012 № 66, которым был утвержден ранее действовавший регламент, признан утратившим силу.

Краснов Л.А.

Редакция журнала «Электроника и электрооборудование транспорта»

О применении положений ранее действовавшего законодательства в области интеллектуальной собственности

Федеральным законом от 12.03.2014 № 35-ФЗ «О внесении изменений в части первую, вторую и четвертую Гражданского кодекса Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации» изменены положения значительного количества статей Гражданского кодекса Российской Федерации (далее – ГК РФ). В связи с этим возникают вопросы, касающиеся правоприменения этих положений в случаях, когда, согласно ГК РФ в прежней редакции, какое-то действие считалось нарушением прав правообладателя, а внесенные изменения такое действие не относят к нарушению. Для разрешения подобных ситуаций в части 7 статьи 7 Федерального закона № 35-ФЗ содержится указание, что «положения Гражданского кодекса Российской Федерации (в редакции настоящего Федерального закона) применяются к правоотношениям, возникшим после дня вступления в силу настоящего Федерального закона. По правоотношениям, возникшим до дня вступления в силу настоящего Федерального закона, положения Гражданского кодекса Российской Федерации (в редакции настоящего Федерального закона) применяются к тем правам и обязанностям, которые возникнут после дня вступления в силу настоящего Федерального закона».

Вопрос о возможности придания обратной силы нормативным правовым

актам неоднократно был предметом рассмотрения Конституционного Суда Российской Федерации (далее – КС РФ).

Вместе с тем Суд по интеллектуальным правам в своем запросе в КС РФ попытался оспорить конституционность части 7 статьи 7 Федерального закона № 35-ФЗ и пункта 1 статьи 4 ГК РФ, устанавливающих правила действия актов гражданского законодательства во времени.

Причиной обращения послужили следующие обстоятельства.

В ходе рассмотрения кассационной жалобы по делу о взыскании денежной компенсации за нарушение авторских прав, выразившееся в публичном исполнении мюзикла при отсутствии согласия авторов, Суд по интеллектуальным правам – исходя из того, что подлежащий применению в данном деле пункт 1 статьи 1274 ГК РФ на момент вынесения постановления судом апелляционной инстанции (15 октября 2014 года) действовал в новой редакции (в связи с вступлением в силу с 1 октября 2014 года Федерального закона № 35-ФЗ), допускающей публичное исполнение правомерно обнародованных произведений путем их представления в живом исполнении, осуществляемое без цели извлечения прибыли в образовательных организациях без согласия автора (подпункт б), – пришел к выводу о наличии неопределенности в вопросе

о соответствии Конституции РФ части 7 статьи 7 Федерального закона № 35-ФЗ во взаимосвязи с пунктом 1 статьи 4 ГК РФ и, приостановив производство по делу, обратился в КС РФ с запросом о проверке их конституционности.

Рассмотрев запрос Суда по интеллектуальным правам, КС РФ указал, что положения части 7 статьи 7 Федерального закона № 35-ФЗ и пункта 1 статьи 4 ГК РФ, содержащие правила действия закона во времени и направленные на обеспечение разумной стабильности законодательного регулирования, обеспечение действия общеправового принципа справедливости, достижение баланса между правами и обязанностями всех участников гражданских правоотношений, возникающих в связи с созданием и использованием произведений науки, литературы, искусства, не могут рассматриваться как нарушающие конституционные права лиц, осуществивших до введения в действие нового правового регулирования публичное исполнение в образовательных организациях правомерно обнародованных произведений путем их представления в живом исполнении без согласия автора.

Федеральным законом № 35-ФЗ внесены изменения и в правила установления использования изобретения, полезной модели и промышленного образца в соответствующих продукте, способе или изделии (пункт 3 статьи 1358 ГК РФ).

В частности, изобретение признается использованным в продукте или способе, если продукт содержит, а в способе использован каждый признак изобретения, приведенный в независимом пункте содержащейся в патенте формулы изобретения, либо признак, эквивалентный ему и ставший известным в качестве такового в данной области техники до даты приоритета изобретения. Ранее известность эквивалентности определялась на другую дату – до совершения в отношении соответствующего продукта или способа действий, предусмотренных пунктом 2 статьи 1358 ГК РФ.

При установлении использования полезной модели в продукте исключена имевшая место ранее возможность

привлечения доктрины эквивалентов.

В результате этого может возникнуть следующая ситуация: согласно действующему законодательству изобретение или полезную модель признать использованной нельзя, а по законодательству, действовавшему до 1 октября 2014 года, – можно. В этом случае, учитывая толкование КС РФ правил действия актов гражданского законодательства во времени, при решении вопроса о нарушении патента следует принимать во внимание дату совершения предполагаемым нарушителем перечисленных в пункте 2 статьи 1358 ГК РФ действий (ввоз на территорию Российской Федерации, изготовление, применение, предложение о продаже, продажа, иное

введение в гражданский оборот или хранение для этих целей продукта, в котором использованы изобретение или полезная модель, и др.), совершение которых является исключительным правом патентообладателя. Если эта дата ранее 1 октября 2014 года, а решение принимается в период действия измененного законодательства, то при определении, используется ли изобретение или полезная модель в продукте, необходимо руководствоваться положениями пункта 3 статьи 1358 ГК РФ в действовавшей до 1 октября 2014 года редакции.

Краснов Л.А.

Редакция журнала «Электроника и электрооборудование транспорта»

Об ознакомлении с документами заявки на выдачу патента на изобретение, полезную модель, промышленный образец

Введены в действие Административный регламент предоставления Федеральной службой по интеллектуальной собственности государственной услуги по ознакомлению с документами заявки на выдачу патента на изобретение, полезную модель, промышленный образец и выдаче копий таких документов и Порядок ознакомления с документами заявки на выдачу патента на изобретение, полезную модель, промышленный образец и выдачи копий таких документов.

Ознакомление с документами заявки и выдача копий таких документов осуществляются по ходатайству любого лица. Ознакомление с документами возможно в том случае, если опубликованы сведения о заявке, которая не отозвана и не признана отозванной на дату публикации (если ходатайство подано лицом, не являющимся заявителем по заявке), а запрошенные документы имеются в заявке и не истек срок их хранения. Ознакомление с документами заявки осуществляется в Роспатенте в соответствии с согласован-

ными датой и временем ознакомления.

Выдача копий документов заявки осуществляется после уплаты соответствующей пошлины.

Установленный порядок не применяется к заявкам на секретное изобретение, а также к сведениям, доступ к которым ограничен законодательством Российской Федерации.

Краснов Л.А.

Редакция журнала «Электроника и электрооборудование транспорта»

Сведения об авторах

Д.Э.Н.
Владимиров Сергей Арсеньевич
+7 812 328 78 02

Петровский Сергей Валерьевич
+7 927 702 64 95

К.Т.Н.
Штанг Александр Александрович
+7 905 954 71 23

Д.Т.Н., профессор
Бадер Михаил Петрович
+7 495 684 22 87

Д.Т.Н., профессор
Герман Леонид Абрамович
+7 908 769 94 26

Попов Юрий Иванович
+7 499 262 73 62

Д.Т.Н., профессор
Плакс Алексей Владимирович
+7 911 756 77 27

К.Т.Н.
Доманов Виктор Иванович
+7 8422 41 18 63

К.Т.Н.
Сурайкин Александр Иванович
+7 927 171 25 67

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: nppteze@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.