

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

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук

Редакция:

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

Подписано в печать: ____ .2019 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 1610.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Ким К.К., Панычев А.Ю., Колесова А.В.

Влияние дисульфида молибдена на износ узла скользящего токосъема . . . 2

Валинский О.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В., Теличенко С.А.

Структурные и схемные решения для транспортных гибридных силовых электроэнергетических установок 7

Титова Т.С., Ролле И.А., Сычугов А.Н., Середа А.Г.

Моделирование реакторного оборудования ЭПС переменного тока 11

Андреев В.Е., Изварин М.Ю., Рязанов Ю.В.

Многоканальные системы защиты от юза и боксования для электрического подвижного состава 14

Зайцев А.А., Крылов А.В., Урушев С.В., Ромен Ю.С.

Электротехнический комплекс интеллектуального управления сохранности перевозимых грузов на железнодорожном транспорте 17

Евстафьева М.В., Изварин М.Ю., Васильев В.А.

Основные направления по повышению энергоэффективности моторвагонного подвижного состава 21

Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Киселев И.Г., Иванов И.А., Макарова Е.И.

Исследование влияния накопителя электрической энергии на показатели движения и неравномерности энергопотребления электрического подвижного состава. 25

Лысов Н.В., Брагин А.Г., Володин А.А., Иващенко В.О.

Проблема электрокоррозии буксовых подшипников электропоездов «Сапсан». 28

Никитин В.В., Середа Г.Е., Трифонов Б.А., Цаплин А.Е.

Средства текущего контроля состояния элементов аккумуляторной батареи пассажирского вагона 32

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Грачев В.В., Курилкин Д.Н., Грищенко А.В., Кручек В.А., Бабков Ю.В., Перфильев К.С., Евсеев В.Ю.

Интеллектуальная система управления тяговым приводом постоянного тока 34

Агунов А.В., Марикин А.Н., Соколов Д.А.

Компьютерное моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока. 38

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

Третьяков А.В., Бурков А.Т., Мазнев А.С., Марков К.В., Зимакова М.В., Петров А.А.

Электрические измерения динамических процессов при ходовых испытаниях грузовых вагонов 41

Влияние дисульфида молибдена на износ узла скользящего токосъема

// The influence of molybdenum disulfide on the sliding wear of the current collection //

**Ким К. К., д.т.н., профессор,
Панычев А. Ю., к.э.н., доцент, Колесова А. В.
ПГУПС, Санкт-Петербург**

Рассматривается метод уменьшения износа контактных вставок токоприемников высокоскоростного электрического транспорта. Метод основан на применении твердой смазки на основе композита дисульфида молибдена, которая наносится на контактный провод дополнительной вставкой, расположенной спереди от контактной вставки. Экспериментально доказываем, что данный метод дает положительный эффект только на переменном токе. Достоинство метода – стабильность во всем диапазоне реальных температур, наблюдаемых на территории России. Показывается, что позитивное действие смазки на характеристики скользящего токосъема снижается при увеличении интенсивности искрения. Доказывается, что выбором соотношения между количеством токоведущих и дополнительных вставок и давлением на дополнительные вставки можно обеспечить получение наилучшего сочетания эксплуатационных свойств и показателей надежности скользящего токосъема.

Ключевые слова: скользящий токосъем, износ, дисульфид молибдена, контактная вставка, высокоскоростной электрический транспорт.

Интенсивный износ контактных вставок токоприемников и контактного провода – одна из основных проблем, возникающих при эксплуатации высокоскоростного электрического транспорта. Решить эту проблему можно с помощью смазки на основе дисульфида молибдена, слой которого наносится на контактный провод с помощью дополнительной вставки, расположенной спереди от токоведущей вставки токоприемника [1–3]. За счет хороших смазочных свойств MoS_2 возможно уменьшить трение в контактной паре при незначительном ухудшении ее электропроводящих характеристик.

При высоких скоростях движения данная смазка ведет себя как квазижидкость, поэтому появляются магнитогидродинамические (МГД) силы в зоне контакта, противоположно направленные относительно силы нажатия токоприемника [4]. В результате в контактной паре появляется зазор, заполненный смазкой и ионизированным воздухом, обуславливающий особенности скользящего токосъема (СКТ) в рассматриваемом случае.

Теоретические исследования при учете всех факторов, влияющих на качество токосъема, представляют собой трудную задачу, поэтому в данной работе представлены результаты экспериментальных исследований.

The method of reducing wear of the contact inserts of current collections of high-speed electric transport is considered. The method is based on the using of solid lubricant on the basis of the disulphide molybden composite. We apply it to the contact wire by the additional insert located in front of the contact inserts. We experimentally proved that this method gives a positive effect only on alternating current. The advantage of the method is the stability in the entire range of real temperatures observed in the territory of Russia. It is shown that the positive effect of the lubricant on the characteristics of the sliding current collector decreases with increasing spark intensity. It is proved that we can provide the best combination of performance properties and reliability of the sliding current collector by the choice of the ratio between the numbers of current inserts and additional inserts and the pressure on the additional inserts.

Keywords: sliding current collector, wear, molybdenum disulfide, contact insert, high-speed electric transport.

Чтобы исследование было возможно провести в лабораторных условиях, линейная система (контактный провод, токоведущая и дополнительная вставка токоприемника) заменялась на ротативную электромашинную (контактное кольцо или коллектор и токоведущая и дополнительные щетки). Если моделировалась контактная сеть постоянного тока, использовалось контактное кольцо, если переменного тока – коллектор.

В ходе экспериментов решались следующие задачи:

- выяснение условий работы СКТ с дисульфидом молибдена, при которых наблюдается минимальный износ токоведущей щетки. Определение величины ее износа

осуществлялось по изменению высоты щеток. Измерение выполнялось с помощью штанги со стрелочным индикатором. Погрешность измерений составляла $\pm 0,01$ мм. Так же определялся вес щеток на аналитических весах типа ВЛР-200 (допустимая погрешность измерения $\pm 0,0005$ г);

- оценка некоторых других характеристик СКТ, обуславливающих его качество, при работе с дисульфидом молибдена.

Методика, используемая при решении, заключалась в сравнении одних и тех же характеристик СКТ как при наличии MoS_2 , так и в его отсутствие.

Варируя параметрами СКТ (давление на дополнительную щетку и их количество) при условии сохранения СКТ своих электротехнических показателей (величина тока, скорость скольжения щетки, уровень искрения), находилось их оптимальное сочетание с позиции МГД-теории.

Исследования на переменном токе

Исследования проводились с токовыми щетками МГС-7 на генераторе ГС-12-ТО, параметры которого приведены в таблице 1.

Длительность одного цикла испытаний – 50 часов. Генератор имеет 6 рядов щеток, по 3 щетки в каждом ряду. Измерения проводились после каждых 10 часов работы. Затем три токоведущих щетки менялись на щетки из MoS_2 . В результате на каждой контактной дорожке находилась одна дополнительная щетка, нажатие на которую составляло 380–390 г. Уменьшение количества токоведущих щеток, т.е. увеличение плотности тока под щеткой, не оказывало заметного влияния на работу генератора.

Использование MoS_2 привело к уменьшению износа токоведущих щеток на 18%. В последующем нажатие на дополнительные щетки было увеличено до 820 г, и генератор проходил испытания на износ токоведущих щеток в стартерном режиме при двойном дублировании эксперимента. В первом дубле износ увеличился на 2,5%, а во втором дубле уменьшился на 23%. Разброс величины износа можно объяснить повышенным давлением на щетки из MoS_2 , которое привело к перегреву смазки и ее полному израсходованию. Чтобы избежать

Таблица 1. Основные характеристики СКТ генератора ГС-12-ТО

Величина	Значение
Номинальный ток, А	≤ 450
Размеры контактной поверхности щеток, мм	9×20
Высота щеток, мм	26
Удельное давление на токовую щетку, г/см ²	~470
Количество токоведущих щеток	18
Средняя плотность тока под щетками, А/см ²	13,8
Линейная скорость перемещения щеток, м/с	35
Материал коллектора	Хромистая бронза

Таблица 2. Параметры СКТ со щетками из MoS₂

Показатель	Значение
Количество токоведущих щеток в генераторе	12
Количество дополнительных щеток в генераторе	6
Давление на дополнительные щетки, г/см ²	160–180
Минимально допустимая высота дополнительных щеток, мм	4
Плотность тока под токовыми щетками, А/см ²	20,3

этого, количество дополнительных щеток на одну контактную дорожку увеличилось до двух. Нажатие на щетку из MoS₂ составляло 280–300 г (160–180 г/см²). Износ токоведущих щеток (плотность тока – 20,3 А/см²) снизился в 2,8 и 2,5 раза в первом и втором дублях соответственно.

Параметры СКТ с наилучшим использованием MoS₂ приведены в таблице 2.

С использованием статистических данных (количество экспериментов – 120) была получена кривая распределения вероятности износа щеток как при наличии в СКТ дисульфида молибдена, так и в его отсутствие. Это позволило рассчитать некоторые показатели качества и надежности СКТ.

Расчеты выполнялись согласно методике, приведенной в [5–7]. Диапазон данных разбивался на равновеликие интервалы протяженностью 0,01 г. Затем находились частоты попадания в каждый интервал с последующим построением гистограмм распределения, которые показаны на рис. 1 и 2.

Видно, что законы распределения указанных величин близки к нормальным и описываются следующей функцией:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – дисперсия, m – математическое ожидание.

Для выбора адекватной кривой распределения методом моментов решалась задача выравнивания статистических рядов. Откорректированные значения математического ожидания и дисперсии износа токоведущих щеток приведены в таблице 3.

Значимость различий между теоретическим и экспериментальным распределениями оценивалась по критерию Пирсона χ^2 .

Распределение вероятностей описывалось нормальной функцией распределения $\Phi^*\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$, а вероятность попадания в каждый из разрядов –

$$p_i = \Phi^*\left(\frac{x_{i+1}-m}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{x_i-m}{\sigma}\right).$$

Тогда χ^2 определялся как $\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - N \cdot p_i)^2}{N \cdot p_i}$.

Расчетное значение χ^2 для работы СКТ без дисульфида молибдена составило 11,08 при числе степеней свободы (r), равном 15. Появление MoS₂ в СКТ понижало χ^2 до 8,42 при числе степеней свободы, равном 10.

Вероятность того, что распределение износа описывается нормальным законом, составляет: без MoS₂ $p \approx 0,76$; с MoS₂ $p \approx 0,61$.

Кривые распределения вероятностей износа даны на рис. 3 и 4.

Количественная оценка эксплуатационных свойств щеток выполнялась по классической методике [8], [5].

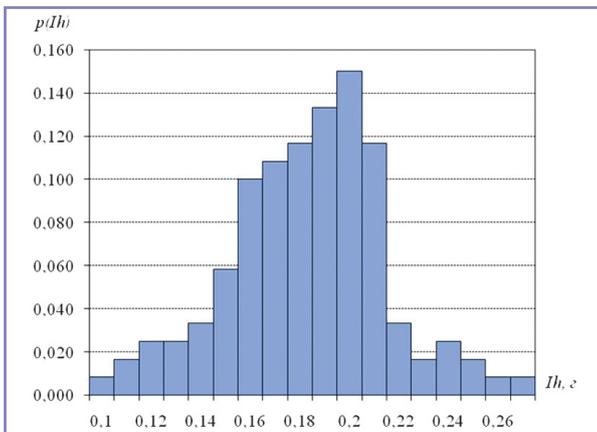
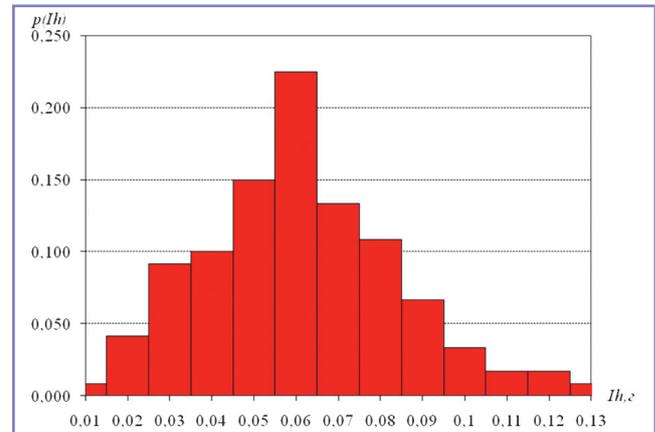
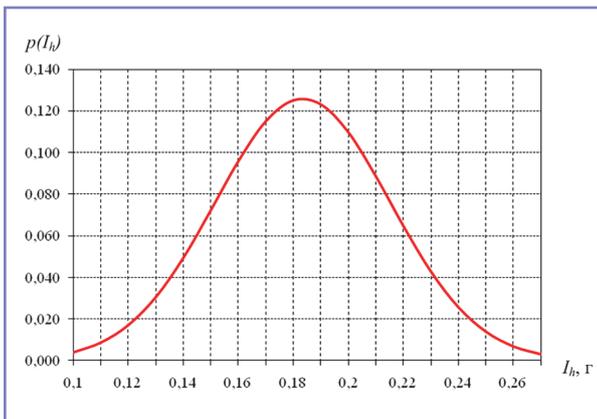
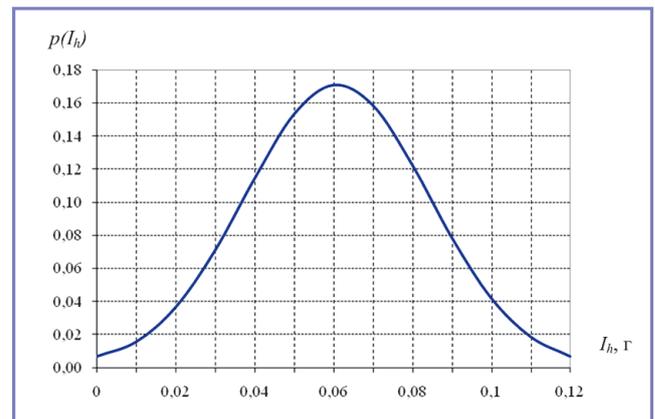
В [9] указывается, что законы распределения всех технических параметров для щеток подчиняются нормальному или близкому к нормальному законам распределения.

Скорость изнашивания щеток (токоосъемных и дополнительных) равна

$$\bar{v} = \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{шт}}} v_i \right) / N_{\text{шт}},$$

Таблица 3. Откорректированные значения математического ожидания и дисперсии износа токоведущих щеток

Условия эксперимента	m_x^*	D_x^*	χ^2	r
Без дисульфида молибдена	0,983	0,083	11,08	15
С дисульфидом молибдена	0,926	0,147	8,42	10

Рис. 1. Гистограмма экспериментального распределения износа без MoS₂Рис. 2. Гистограмма экспериментального распределения износа с MoS₂Рис. 3. Теоретическое распределение вероятностей износа щеток без MoS₂Рис. 4. Теоретическое распределение вероятностей износа с MoS₂

где $N_{щ}$ – количество щеток, на которых определялся износ, v_i – средняя скорость изнашивания щеток (токоёмных и дополнительных).

Стандартное отклонение точной оценки в общем количестве находившихся под наблюдением щеток определялось по соотношению

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N_{щ}-1} \left(\sum_{i=1}^{N_{щ}} v_i^2 - N_{щ} \bar{v}^2 \right)}$$

Вероятная максимальная скорость изнашивания составляла $v_{max} = \bar{v} + 3\sigma_v$.

После расчетов определялись показатели надежности работы токоведущих щеток.

Точечная оценка среднего ресурса работы щетки находилась по формуле

$$\bar{T}_p = \frac{\Delta m_{np}}{\bar{v}} \left[1 + \left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}} \right)^2 \right]$$

где Δm_{np} – изнашиваемая масса щетки, а дисперсия оценки –

$$D_{\bar{T}_p} = \frac{1}{N_{щ}} \left(\frac{\Delta m_{np}}{\bar{v}} \right)^2 \times \left[\left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}} \right) + 8 \left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}} \right)^4 \right]$$

Односторонняя нижняя доверительная граница с доверительной вероятностью $\beta = 0,8$ рассчитывалась по формуле $T_{\beta} = \bar{T}_p - U_{\beta} \sqrt{D_{\bar{T}_p}}$, где U_{β} – квантиль нормального закона распределения, определяемый по [9], при $\beta = 0,8$, $U_{\beta} = 0,842$.

Результаты сравнения эксплуатационных свойств и расчет показателей надежности представлены в таблицах 4 и 5.

Согласно результатам эксперимента констатировалось следующее:

- MoS_2 значительно улучшает показатели эксплуатационных свойств и надежности СКТ на переменном токе, а именно: износ щеток понизился в 2,5–2,8 раза, а средний ресурс работы повысился в 3,6 раза;
- выбором соотношения между количеством токоведущих и дополнительных щеток и давления на последние можно получить наилучшее сочетание эксплуатационных свойств и показателей надежности СКТ.

Влияние температуры окружающей среды на работу СКТ с MoS_2

Из результатов исследований, приведенных в таблице 6, следует, что применение MoS_2 в случае использования щеток Г-21А и коллекторов из хромистой бронзы приводит в нормальных условиях к уменьшению их износа на 37%, при температуре $120 \pm 3^\circ C$ износ уменьшается в 5 раз, а при температуре $-60 \pm 3^\circ C$ – в 6,5 раза, что объясняется сильной зависимостью смазывающих свойств

MoS_2 от температуры и влажности среды. Эксперимент проводился при оптимальных сочетаниях давления на дополнительную щетку и количества MoS_2 . Значения полученных данных подтверждает гипотезу о стабильности смазывающих свойств MoS_2 в диапазоне реально достижимых температур [9].

Исследование влияния дисульфида молибдена на уровень искрения в СКТ

Исследовался СКТ приводного двигателя насоса «Кама-8» (150 Вт, 220 В переменного тока), в котором использовались токоведущие щетки ЭГ-74. Эксперименты трижды дублировались. Продолжительность каждого опыта составляла 100 часов. В конце каждого опыта измерялись ток и частота вращения. Исследования проводились при значениях напряжения, равных 80, 100, 160, 180 В.

Давление на щетку из MoS_2 и на токоведущие щетки было одинаковым.

В таблицах 7 и 8 приведены результаты экспериментов. Можно заметить, что зависимости износа щеток от интенсивности искрения, плотности тока, частоты вращения подчиняются экспоненциальному закону, что связано с одновременным увеличением искровой эрозии и температуры элементов контактной пары. Использование щетки из MoS_2 (таблица 8) приводит к уменьшению износа токоведущих щеток, например, при напряжении 180 В и интенсивности искрения в 2 балла износ токоведущих щеток уменьшился на 20%, при напряжении 160 В и интенсивности искрения в 1½ балла износ щеток упал на 40%, при напряжении 100 В и интенсивности искрения в 1¼ балла износ щеток уменьшился в 2,5 раза, а при напряжении 80 В и интенсивности искрения в 1¼ балла износ токоведущих щеток уменьшился в 4 раза. Отметим: при увеличении уровня искрения положительный эффект от применения щетки из MoS_2 снижается, но по-прежнему наблюдается снижение износа токоведущих щеток и уменьшение интенсивности искрения (рис. 5).

Исследования на постоянном токе

Для экспериментов по исследованию эффективности применения дополнительного вставок на основе дисульфида молибдена в контактной сети постоянного тока использовался синхронный генератор типа СГР (4,5 кВт, плотность тока под щетками ЭГ-4 (12,5×10 мм) – 12 А/см², линейная скорость скольжения щеток по контактному бронзовому кольцам – 10 м/с, давление на щетку – 300 г/см²).

Эксперименты проводились по аналогии с вышеописанным случаем переменного тока. Полученные зависимости представлены на рис. 6. Сплошной линией показан износ анодных и катодных щеток в отсутствие MoS_2 , штриховой – при наличии MoS_2 .

Анализируя зависимости на рис. 6, можно заметить, что использование щеток из MoS_2 на постоянном токе практически не приводит к уменьшению износа.

На токоведущих анодных щетках (контактном проводе) в результате электролиза наблюдается сильная эрозия контактной поверхности, на катодном кольце (контактная вставка токоприемника) происходит интенсивное

Таблица 4. Показатели надежности СКТ без применения MoS_2

Показатель	Значение
Точечная оценка скорости изнашивания щеток (токоведущих), \bar{V} , г/ч	0,007
Стандартное отклонение точечной оценки в общем количестве находившихся под наблюдением щеток, σ_v , г/ч	0,00031
Вероятное наибольшее значение скорости изнашивания, v_{max} , г/ч	0,008
Точечная оценка среднего ресурса работы щетки, ч	1161
Дисперсия оценки, ч²	159,4
Односторонняя нижняя доверительная граница с доверительной вероятностью $\beta = 0,8$, ч	1151

Таблица 5. Зависимость показателей надежности СКТ от толщины слоя MoS_2

Соотношение токоведущих и дополнительных щеток	Плотность тока под токовыми щетками, А/см²	Давление на токоведущие щетки, г/см²	Давление на дополнительные щетки, г/см²	Показатели эксплуатационных свойств и надежности токоведущих щеток	Показатели эксплуатационных свойств и надежности дополнительных щеток
5/1	16,6	470	215	$v_{cp} = 0,006$ $\sigma_v = 0,00066$ $v_{max} = 0,0078$ $\bar{T}_p = 1383$ $D\bar{T}_p = 1423$ $\bar{T}_{pon} = 1351$	$v_{cp} = 0,0057$ $\sigma_v = 0,00053$ $v_{max} = 0,0072$ $\bar{T}_p = 3794$ $D\bar{T}_p = 33188$ $\bar{T}_{pon} = 3641$
5/1	16,6	470	455	$v_{cp} = 0,009$ $\sigma_v = 0,0003$ $v_{max} = 0,0098$ $\bar{T}_p = 858$ $D\bar{T}_p = 54,18$ $\bar{T}_{pon} = 852$	$v_{cp} = 0,027$ $\sigma_v = 0,0022$ $v_{max} = 0,034$ $\bar{T}_p = 784$ $D\bar{T}_p = 1174$ $\bar{T}_{pon} = 755$
2/1	20,3	470	160 – 180	$v_{cp} = 0,003$ $\sigma_v = 0,0001$ $v_{max} = 0,005$ $\bar{T}_p = 4136$ $D\bar{T}_p = 147980$ $\bar{T}_{pon} = 3839$	$v_{cp} = 0,012$ $\sigma_v = 0,0026$ $v_{max} = 0,02$ $\bar{T}_p = 2028$ $D\bar{T}_p = 29311$ $\bar{T}_{pon} = 1893$

Таблица 6. Влияние температуры на смазочные свойства MoS_2

Условия опытов	Марка щеток	Климатические условия		
		Нормальные	$t = 120 \pm 3^\circ\text{C}$	$t = -60 \pm 3^\circ\text{C}$
		Износ, $\text{мм} \times 10^{-4}$		
MoS_2 нет	Г-21А	9,74	12,18	26,8
MoS_2 есть	Г-21А	6,09	2,43	3,65

Таблица 7. Влияние интенсивности искрения на износ токоведущих щеток без применения MoS_2

U, В	n, об/мин	I, А	Искрение, баллы		Износ щеток, мм	
			щетка 1	щетка 2	щетка 1	щетка 2
80	1350	1,8	1¼	1¼	1,0	1,17
100	1900	2,2	1½	1½	1,24	1,53
160	3600	3,4	2	2	2,49	2,34
180	4800	3,6	>2	>2	3,14	4,12

Таблица 8. Влияние интенсивности искрения на износ щеток при применении MoS_2

U, В	n, об/мин	I, А	Искрение, баллы		Износ щеток, мм		
			щетка 1	щетка 2	щетка 1	щетка 2	доп. щетка
80	1500	1,8	1¼	1¼	0,22	0,31	0,02
100	2200	2,2	1½	1½	0,48	0,55	0,07
160	4000	3,4	1½	1½	1,31	1,91	0,08
180	4800	3,6	2	2	2,2	3,07	0,23

избыточное отложение дисульфида молибдена, т.е. повышается переходное сопротивление контакта.

С переменным током процессы электрохимического разложения и восстановления взаимно компенсируют друг друга, что позволяет дисульфиду молибдена проявить сполна свои смазочные свойства. Поэтому наилучшее применение дисульфида молибдена как смазывающего материала следует ожидать в системах скользящего токосъема, работающих на переменном токе. Кроме того, при прохождении переменного электрического тока качество покрытия из дисульфида молибдена будет выше, а образовавшаяся пленка будет иметь более упорядоченную кристаллическую решетку [11].

Выводы

1. Вероятностное распределение износа щеток (контактных вставок) со смазкой из дисульфида молибдена и без нее подчиняется нормальному или близкому к нормальному законам распределения.
2. Выбором соотношения между количеством токоведущих и дополнительных щеток (вставок) и давления на дополнительные щетки (вставки) можно обеспечить наилучшее сочетание эксплуатационных свойств и показателей надежности СКТ.
3. Смазывающие свойства MoS_2 стабильны во всем диапазоне реально достижимых температур.
4. При увеличении уровня искрения положительный эффект от применения щетки

(вставки) из MoS_2 снижается, но по-прежнему наблюдается снижение износа токоведущих щеток (вставок) и уменьшение интенсивности искрения.

5. Положительный эффект по снижению износа токоведущих вставок (щеток) благодаря использованию смазки из дисульфида молибдена проявляется только на переменном токе.

Литература

1. Патент № 2284269 U1 Российская Федерация, МПК7 В60L 5/24. Пантографный токосъемник для электрического подвижного состава / К.К. Ким, С.Л. Колесов, С.М. Ксенофонтов; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. № 2005112484/11; заявл. 25.04.2005; опубл. 27.09.06. Бюл. № 27.
2. Патент № 84790 U1 Российская Федерация, МПК7 В60L 13/10. Транспортная система высокоскоростного наземного транспорта / К.К. Ким, С.Л. Колесов; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. № 2009107253/22; заявл. 27.02.2009; опубл. 20.07.09. Бюл. № 20.
3. Ким К.К. Улучшение токосъема в транспортной системе типа HYPERLOOP / К.К. Ким, А.В. Колесова, С.Л. Колесов // Транспортные системы и технологии, 2019, № 2, т. 5.– С. 5–15.
4. Ким, К.К. Аспекты МГД теории работы системы скользящего токосъема с контактными кольцами / К.К. Ким, С.Л. Колесов // Электричество, 2002, № 10.– С. 44–50.
5. Вентцель Е. Теория вероятностей / Е. Вентцель.– М: Высшая школа, 2006.– 575 с.
6. Адлер Ю.Н. Введение в планирование эксперимента / Ю.Н. Адлер – М.: Металлургия, 1969.– 158 с.
7. Хьюстон А. Дисперсионный анализ / А. Хьюстон.– М.: Статистика, 1971.– 88 с.
8. Ковалев И.Ф. Расчет надежности щеточного аппарата электрических машин // Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1972, № 2.– С. 7–9.
9. Лившиц П.С. Щетки электрических машин / П.С. Лившиц.– М.: Энергоатомиздат, 1989.– 80 с.
10. Комиченко С.О., Расцепкина Д.А., Петров А.А., Третьяков А.В. Климатические испытания по оценке стабильности рабочих характеристик тензорезисторов и надежности их клеевой

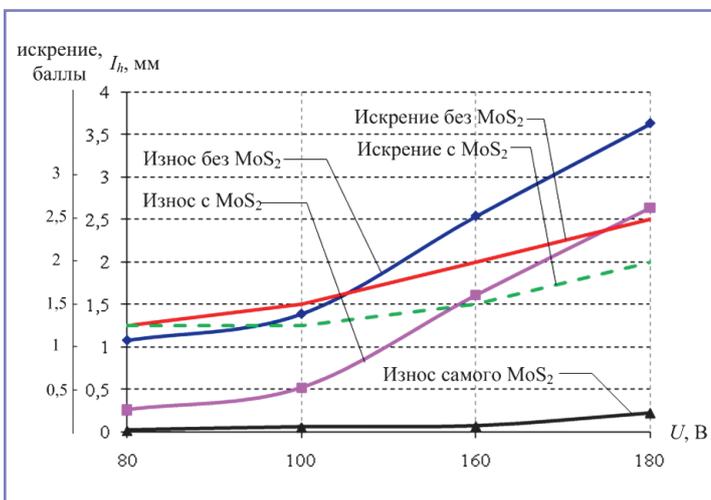


Рис. 5. Влияние MoS_2 на износ токоведущих щеток насоса «Кама-8» и на интенсивность искрения

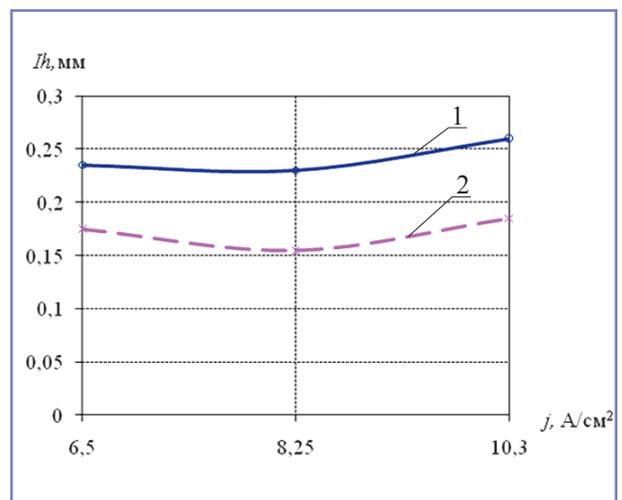


Рис. 6. Влияние дисульфида молибдена на износ щеток на постоянном токе: кривая 1 – в отсутствие MoS_2 , кривая 2 – при наличии MoS_2

фиксации / Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. Материалы XIII Международной научно-технической конференции // СПб, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018.

11. Rittenhouse J.B., Jaffe L.D., Nageler R.G., Martens H.E. Friction measurements on a low Earth satellite. – ASLE Transact, 1963, vol. 6, № 3. – Pp. 161–177.

Ким Константин Константинович

Родился в 1958 году. В 1980 году окончил Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) по специальности «Инженерная электрофизика». Доктор технических наук, профессор. В 1998 году защитил докторскую диссертацию на тему «Электродинамика систем электродвижения с использованием сверхпроводимости и магнитного подвеса». Опыт работы – 39 лет. В настоящее время заведует кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС. Имеет 560 печатных научных трудов, в том числе 201 патент.

Панычев Александр Юрьевич

Родился в 1974 году. В 1998 году окончил Омский государственный университет путей сообщения по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Кан-

дидат экономических наук, доцент. В 2001 году защитил диссертацию по теме «Оценка и прогнозирование эффективного использования материально-энергетических ресурсов в структурных подразделениях железнодорожного транспорта». Опыт работы – 23 года. В настоящее время является ректором Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Имеет более 100 научных работ.

Колесова Анна Владимировна

Родилась в 1976 году. В 1999 году окончила Вятский государственный технический университет по специальности «Электромеханика». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» и учится в аспирантуре ПГУПС. Имеет 6 научных публикаций.

Kim Konstantin

Was born in 1958. He graduated from Leningrad Polytechnic Institute with specialization in "Engineering electrophysics". Doctor of engineering, professor. In 1998 he defended his doctoral dissertation on the topic "The electrodynamics of electrical propulsion systems using superconductivity and magnetic suspension". He has 39 years of work

experience. Currently he works as head of the Electrical engineering and heat-power engineering department at PGUPS. He is an author of 560 publications, including 201 patents.

Panychev Alexander

Was born in 1974. In 1998 he graduated from the Omsk State University of Railway Engineering with a degree in Automation, telemechanics and communication in the railway transport. Candidate of economic sciences, associate professor. In 2001 he defended his thesis on the topic "Assessment and forecasting of the effective use of material and energy resources in the structural divisions of railway transport". Work experience – 23 years. At present he is a rector of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. He has more than 100 scientific papers.

Kolesova Anna

Was born in 1976. In 1999 she graduated from Vyatka State University majoring in "Electromechanics". She has 18 years of work experience. At present she works as senior teacher of Electrical engineering and heat-power engineering department and studies for PhD of PGUPS. She has 6 scientific publications.

Структурные и схемные решения для транспортных гибридных силовых электроэнергетических установок

// Structural and scheme solutions for transport hybrid power electric plants //

Валинский О. С.,

ОАО «РЖД», Москва

Евстафьев А. М., д.т.н., доцент,

Никитин В. В., д.т.н., доцент, Теличенко С. А.,

ПГУПС, Санкт-Петербург

Гибридные силовые энергетические установки с бортовыми накопителями энергии позволяют существенно повысить энергетическую эффективность транспортных средств за счет аккумулирования и рационального использования энергии торможения. Актуальными задачами в данной сфере являются обоснование структуры транспортной энергосистемы и разработка схемных решений полупроводниковых преобразователей для управления потоками энергии бортовых накопителей. В настоящей статье дан анализ вариантов структуры транспортных гибридных энергосистем, а также предложен вариант схемного решения двунаправленного полупроводникового преобразователя повышающе-понижающего типа для накопителя энергии.

Ключевые слова: гибридная силовая энергетическая установка, накопители энергии, транспортные средства.

В настоящее время ведущими мировыми производителями транспортных средств уделяется особое внимание повышению экономичности их силовых энергетических установок. Прорывные технологии в этой сфере предполагают дополнение энергетических комплексов бортовыми энергонакопительными системами. Подобного рода энергетические комплексы получили название гибридных силовых установок, поскольку предполагают использование источников энергии с различными характеристиками, в том числе способных аккумулировать электрическую энергию, преобразуемую из кинетической, при торможении транспортного средства.

В последние десятилетия развитие технологий создало предпосылки к разработке энергонакопительных систем, обладающих высокими удельными массогабаритными показателями и коммерческой доступностью, что дало новый импульс разработке гибридных силовых энергетических установок и использованию их на транспортных средствах [1–3]. При этом стало возможным устанавливать на одном транспортном средстве две или несколько энергетических установок, либо двигателей или тяговых передач. Это позволило, практически не снижая эксплуатационные характеристики, увеличить энергетическую и экономическую эффективность транспортных средств.

Hybrid power plants with on-board energy storage can significantly increase the energy efficiency of vehicles through the accumulation and rational use of braking energy. The urgent tasks in this area are the justification of the structure of the transport power system and the development of circuit solutions for semiconductor converters for controlling the energy flows of on-board storage devices. This article analyzes the options for the structure of transport hybrid power systems, and also proposes a circuit design for a bidirectional up-down semiconductor converter for an energy storage device.

Keywords: hybrid power plant, energy storage, vehicles.

Преимущества гибридных энергетических установок и актуальные проблемы

Гибридные силовые установки обладают рядом преимуществ, делающих целесообразным их применение на транспорте. Гибридная энергетическая система может использовать взаимодополняющий характер различных источников энергии, что повышает общую эффективность системы, ее производительность, качество и надежность электропитания потребителей. Гибридные энергетические системы могут быть спроектированы таким образом, чтобы максимально использовать возобновляемые ресурсы, что для транспортных средств с первичным тепловым двигателем позволит снизить вредные выбросы продуктов сгорания топлива и обеспечить гибкость с точки зрения эффективного использования возобновляемых источников энергии.

Наряду с этим имеет место и ряд проблем, связанных с использованием гибридных энергосистем. Наличие на транспортном средстве источников энергии сопоставимой мощности с различными свойствами и характеристиками требует выработки оптимальной стратегии управления энергетическими потоками в разнообразных режимах работы; резкое изменение мощности, потребляемой от любого из источников, или внезапное изменение нагрузки могут существенно повлиять на стабильность и эффективность энергосистемы. По этой

причине актуальной задачей является разработка средств управления энергетическими потоками при зарядно-разрядных процессах бортовых накопителей энергии.

Требования к накопителям энергии и их виды

Основные критерии, которым должны соответствовать транспортные бортовые накопители энергии, следующие: высокие удельные массогабаритные показатели по мощности и запасаемой энергии; невысокая удельная стоимость накопителя, обуславливающая капитальные затраты; долговечность, характеризующая количество зарядно-разрядных циклов; широкий диапазон рабочих температур; простота обслуживания в эксплуатации; соответствие времени зарядно-разрядных процессов накопителя режимам работы тягового привода; малые потери при заряде, разряде и хранении энергии; время реверса мощности, в течение которого накопитель может быть переведен из режима источника энергии в режим накопления и наоборот; глубина разряда; безопасность работы.

Для транспортных силовых электроэнергетических установок наиболее целесообразны накопители энергии на основе суперконденсаторов и аккумуляторных батарей.

Емкостные накопители (ЕН) энергии на базе суперконденсаторов характеризуются высокими значениями удельной энергии (кДж/кг) и сравнительно высокой стоимостью единицы запасаемой энергии. При этом по стоимости единицы мощности, которую может запасть и отдавать ЕН, они сопоставимы с широко распространенными в настоящее время кислотными и щелочными аккумуляторными батареями. Кроме того, ЕН на базе суперконденсаторов имеют по сравнению с кислотными и щелочными аккумуляторными батареями более высокий КПД, существенно больший срок службы, не требуют обслуживания в эксплуатации. Такие свойства суперконденсаторов делают целесообразным их использование в составе гибридных транспортных энергосистем в качестве буферных накопителей энергии, предназначенных для реализации больших мощностей заряда-разряда, т.е. накопления и отдачи относительно больших энергий за относительно короткое время [4].

Аккумуляторные батареи (АБ) в настоящее время являются наиболее распространенным типом накопителей энергии, используемых на транспортных средствах. Недостатками традиционно использовавшихся кислотных и щелочных АБ являются ограниченный срок службы, относительно невысокий КПД и необходимость обслуживания в эксплуатации. Литий-ионные АБ, технология производства которых интенсивно развивается в настоящее время, имеют по сравнению с кислотными и щелочными АБ в несколько раз большую

удельную энергоёмкость, более высокий КПД и не требуют обслуживания в эксплуатации. Стоимость единицы энергии литий-ионных АБ превышает аналогичный показатель кислотных и щелочных АБ, но меньше, чем у суперконденсаторных ЕН [5]. Областью целесообразного использования литий-ионных АБ на подвижном составе являются бортовые накопители энергии, предназначенные для хранения больших запасов энергии и заряда-разряда в течение длительного времени, с реализацией относительно небольших мощностей.

Режимы работы транспортных (бортовых) энергосистем характеризуются разнообразием, но основными являются пуско-тормозные режимы, при которых требуется развивать большие мощности в течение относительно короткого времени, и режимы установившегося движения, при которых потребляется относительно небольшая мощность в течение длительного времени. Анализ свойств и характеристик накопителей различных типов позволяет сделать вывод, что для повышения энергоэффективности тягового подвижного состава наиболее целесообразно применение гибридных накопителей энергии на базе емкостных и электрохимических (аккумуляторных батарей) накопителей [6, 7].

Выбор структуры гибридной энергосистемы

Структура гибридной силовой энергетической установки определяется следующими факторами: количеством, энергоёмкостью и мощностью источников (накопителей) энергии; эксплуатационными свойствами энергонакопительных блоков; наличием и видом основных и резервных источников энергии (контактная сеть, дизель-генераторные установки и т.п.); режимами работы электроэнергетической системы; возможностью размещения структурных элементов в ограниченных габаритах подвижного состава; стоимостными показателями.

Для транспортной гибридной силовой энергоустановки возможны следующие варианты структуры (рис. 1): последовательная

структура с централизованной шиной постоянного тока, последовательная структура с централизованной шиной переменного тока, параллельная гибридная схема, коммутируемая гибридная схема.

При последовательной гибридной системе с централизованной шиной постоянного тока все источники энергии, устройства хранения и потребители энергии подключаются к шине постоянного тока через полупроводниковые преобразователи (рис. 1а). Шина постоянного тока исключает необходимость согласования частоты и фазы напряжения отдельных источников, подключенных к шине. Статическая нагрузка может быть напрямую подключена к шине постоянного тока, что уменьшает гармоники от силовых электронных преобразователей. Однако структура с шиной постоянного тока имеет меньшую эффективность, если источник и потребитель являются структурными элементами переменного тока, т.к. в этом случае необходимо двухступенчатое преобразование энергии. Другим ограничением является то, что инвертор нагрузки переменного тока должен быть рассчитан на пиковую мощность и в случае его отказа возможна полная потеря питания нагрузки.

В последовательной гибридной системе с централизованной шиной переменного тока все источники энергии и потребители постоянного тока подключаются к шине переменного тока через полупроводниковые преобразователи (рис. 1б). Такая модульная конфигурация позволяет наращивать количество и мощность потребителей энергии, однако требует согласования частоты, фазы и амплитуды напряжения инверторов и источников переменного тока, а также дополнительных мер по снижению содержания высших гармоник и обеспечению качества питания потребителей.

Параллельная гибридная система (рис. 1в) позволяет подключать источники и потребители переменного тока напрямую к шине переменного тока, а источники и потребители постоянного тока – к шине постоянного тока. Двухнаправленный полупроводниковый

преобразователь, соединяющий обе шины, обеспечивает обмен энергией между шинами. Требуемая номинальная мощность преобразователя меньше, чем у последовательной конфигурации, однако необходима синхронизация выходного напряжения преобразователя и источника переменного тока.

В коммутируемой гибридной системе (рис. 1г) источники переменного тока (контактная сеть, дизель-генератор) могут напрямую подключаться к нагрузке, что сокращает потери энергии и не требует синхронизации источников. Однако такая структура имеет недостатки, в частности, во время коммутации между источниками постоянного и переменного тока питание потребителей прерывается.

При использовании гибридных энергетических систем в качестве транспортных силовых энергоустановок с емкостными и электрохимическими накопителями энергии наиболее целесообразной является структура системы со звеном (шиной) постоянного тока. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Оба вида накопителей энергии являются системами постоянного тока. Кроме этого, подключение аккумуляторной батареи и суперконденсаторного накопителя к шине постоянного тока через индивидуальные преобразователи постоянно-постоянного тока позволяет обеспечить оптимизированные зарядно-разрядные режимы накопителей. При этом аккумуляторные батареи используются в качестве источников энергии для квазистационарных режимов, а суперконденсаторы предназначены для быстрого динамического регулирования мощности. Напряжение от контактной сети или дизель-генераторной установки также подается на шину постоянного тока через преобразователь энергии, тип которого определяется родом тока этих источников энергии.

Исходя из этого, наиболее целесообразной для применения в транспортных гибридных силовых энергосистемах является мультikonверторная гибридная схема с общей шиной постоянного тока (рис. 2).

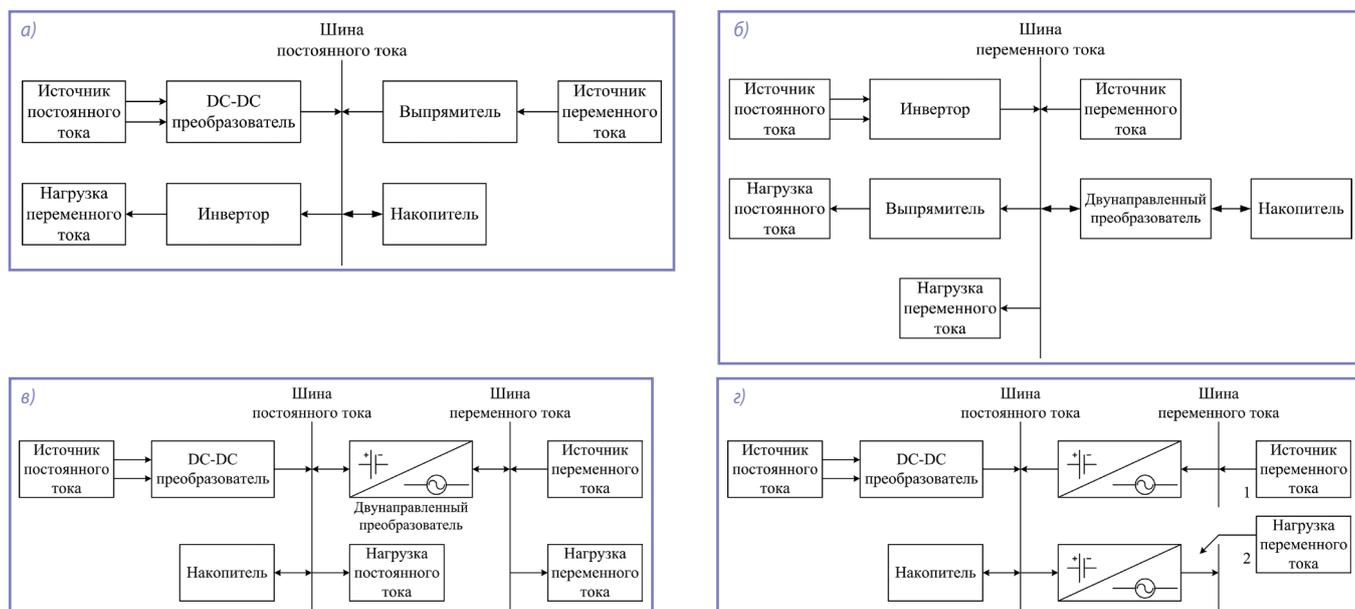


Рис. 1. Варианты структурного исполнения транспортной гибридной силовой энергетической установки:
 а) структура с централизованной шиной постоянного тока; б) структура с централизованной шиной переменного тока;
 в) параллельная гибридная структура; з) коммутируемая гибридная структура

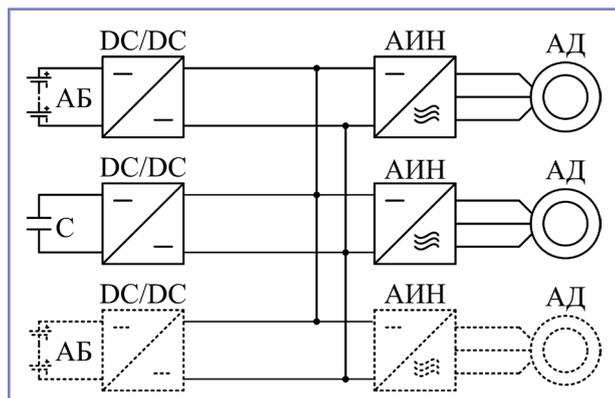


Рис. 2. Мультikonверторная гибридная схема

Поскольку между любым накопителем энергии и шиной постоянного тока имеется двунаправленный преобразователь, число источников и преобразователей теоретически может быть любым. Общая шина постоянного тока может питаться от другого источника, например, от контактной сети или дизель-генератора (в случае контактной сети или дизель-генератора переменного тока – через выпрямитель). Преимуществом данной схемы является возможность независимого управления потоками энергии и полное использование энергии, запасенной в суперконденсаторах и аккумуляторной батарее. Схема сохраняет работоспособность при полном исчерпании энергии одного из источников либо в случае его неисправности, если во втором накопителе сохраняется достаточный запас энергии. Данная система позволяет поддерживать постоянное напряжение на звене (шине) постоянного тока или регулировать его при необходимости, а также оптимизировать режимы заряда и разряда накопителей энергии. К недостаткам данной схемы нужно отнести большое число преобразователей энергии и связанные с этим потери мощности. Кроме того, необходим двунаправленный DC-DC-преобразователь, работающий в режимах повышения и понижения напряжения накопителей энергии в зависимости от степени их заряда.

Схемные решения преобразователей энергии

Важным структурным элементом мультikonверторной гибридной схемы силовой энергетической установки является

двунаправленный многофункциональный преобразователь постоянного напряжения, который должен обеспечивать режим заряда и разряда накопителей и работать в повышающем и понижающем режимах в зависимости от состояния заряда накопителя. Вариант принципиальной схемы такого преобразователя представлен на рис. 3 (в качестве накопителя энергии изображен емкостный накопитель; для заряда и разряда аккумуляторной батареи может быть использована та же принципиальная схема).

При заряде накопителя тяговый двигатель работает в режиме генераторного электрического торможения, а DC-DC-преобразователь – в режиме понижающего преобразователя (рис. 3а). На интервале времени открытого состояния транзистора VT1 происходит медленное увеличение тока i_t на индуктивности L_s , накопитель энергии заряжается, а напряжение на нем увеличивается. На следующем интервале, когда транзистор VT1 выключен, ток индуктивности i_t протекает через диод VD2. При разряде накопителя его напряжение уменьшается, а напряжение шины постоянного тока должно поддерживаться стабильным, поэтому преобразователь постоянного напряжения должен работать в повышающем режиме (рис. 3б). На интервале времени, когда транзистор VT2 открыт, ток протекает в контуре, образованном емкостным накопителем и индуктивностью L_s , что соответствует запасанию энергии в индуктивности. На следующем интервале времени транзистор VT2 закрывается и энергия накопителя C_s и индуктивности L_s передается в звено постоянного тока.

Выводы

Гибридные силовые энергетические установки позволяют существенно повысить энергетическую эффективность транспортных средств за счет рационального использования кинетической энергии при электрическом торможении и взаимодополняющего характера различных накопителей энергии, прежде всего емкостных (суперконденсаторы)

и электрохимических (аккумуляторные батареи). Актуальными задачами при разработке гибридных транспортных энергосистем являются выбор оптимальной структуры системы и схемных решений преобразователей энергии, обеспечивающих использование бортовых накопителей. Для транспортных гибридных энергосистем наиболее целесообразной является мультikonверторная структура со звеном (шиной) постоянного тока, обеспечивающая независимое управление потоками энергии от каждого накопителя и возможность оптимизации их зарядно-разрядных режимов. При этом каждый вид накопителя энергии должен быть подключен к общему звену постоянного тока через двунаправленные индивидуальные преобразователи постоянно-постоянного тока, работающие в повышающем и понижающем режимах.

Литература

1. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук // М., МИИТ, 2000. – 451 с.
2. Штанг А.А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Новосибирск: НГТУ, 2006. – 233 с.
3. Спиридонов Е.А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Новосибирск: НГТУ, 2010. – 165 с.
4. Васильев В.А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии на электрическом подвижном составе // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2011, № 1 (26). – С. 35–44.
5. Kim K.K. Theoretical foundations of electrical engineering // Саратов: издательство IPR Media, 2017. – 280 с.
6. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В. Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава // Электротехника, 2018, № 10. – С. 21–25.
7. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава // Транспорт Российской Федерации, 2018, № 6 (79). – С. 40–44.

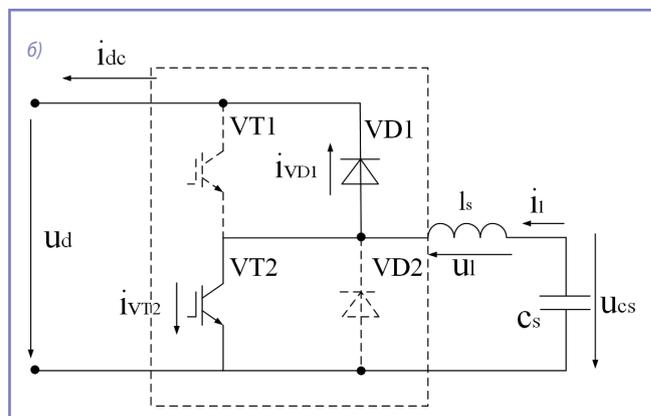
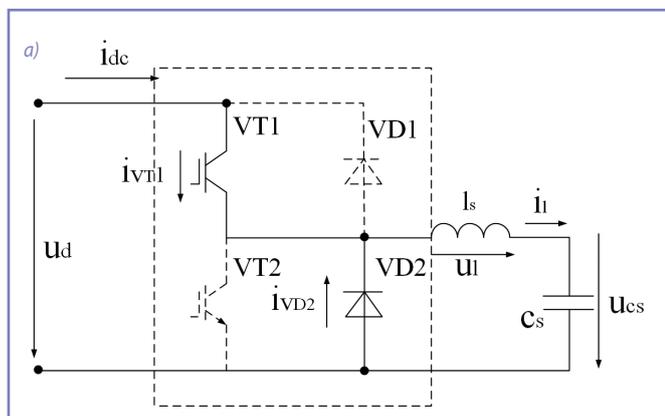


Рис. 3. Двунаправленный преобразователь постоянного напряжения для накопителя энергии в мультikonверторной гибридной схеме: а) схема преобразователя в понижающем режиме; б) схема преобразователя в повышающем режиме

Валинский Олег Сергеевич

Родился в 1961 году. В 1997 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Организация перевозок и управление на транспорте, инженер по организации и управлению». Опыт работы – 36 лет. В настоящее время работает заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Дирекции тяги. Имеет 24 научные публикации.

Евстафьев Андрей Михайлович

Родился в 1979 году. Окончил ПГУПС по специальности «Электрический транспорт». Доктор технических наук, доцент. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава». Опыт работы – 17 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 100 научных трудов.

Никитин Виктор Валерьевич

Родился в 1966 году. В 1988 году окончил электромеханический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. Доктор технических наук, доцент. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Теоретические исследования электромагнитной совместимости сверхпроводникового оборудования с электрооборудованием традиционного исполнения». Опыт работы – 31 год. В настоящее

время работает профессором кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС. Имеет около 80 научных трудов, включая патенты на полезные модели и свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Теличенко Станислав Алексеевич

Родился в 1989 году. В 2013 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 6 лет. В настоящее время работает заведующим лабораторией кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 4 публикации в рецензируемых журналах, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Valinskiy Oleg

Was born in 1961. In 1997 he graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in "Organization of transportation and management of transport, organization and management engineer". He has 36 years of work experience. At present he works as deputy general director of joint stock company "Russian Railways", the chief of board of directors of Electric operation department. He has 24 scientific publications.

Evsstafev Adnrey

Was born in 1979. He graduated from PGUPS majoring in "Electric transport". He is a doctor of technical

sciences, associate professor. In 2018 he defended the dissertation with topic "Energy efficiency improvement of electric rolling stock". He has 17 years of work experience. At present he works as chief of Electric traction department of PGUPS. He has more than 100 scientific works.

Nikitin Viktor

Was born in 1966. In 1988 he graduated from electromechanical faculty of the Leningrad Institute of Railway Engineers. Doctor of technical sciences, associate professor. In 2004 he defended his thesis on the topic "Theoretical studies of the electromagnetic compatibility of superconducting equipment with traditional-style electrical equipment". Has 31 years of working experience. At present he is a professor of Electrical engineering and power engineering department of PGUPS. He has about 80 scientific papers, including patents for utility models and certificates for registration of computer programs.

Telichenko Stanislav

Was born in 1989. In 2013 he graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in "Electric transport of railroad". He has 6 years of work experience. At present he works as chief of laboratory of Electric operation department of PGUPS. He has 4 publications in peer-reviewed journals, 3 certificates of registration of computer software program.

// Моделирование реакторного оборудования ЭПС переменного тока //

// Modeling a locomotive reactor in alternating current //

Титова Т. С., д.т.н., профессор, Ролле И. А., к.т.н., доцент,
Сычугов А. Н., СерEDA А. Г.,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Исследования, посвященные актуальной задаче по увеличению энергетической эффективности подвижного состава, как правило, выполняются с помощью компьютерного моделирования. Одной из наиболее распространенных программ для решения этой задачи является MATLAB (Simulink). В статье рассмотрены особенности моделирования реакторного оборудования ЭПС переменного тока с помощью инструментов Simulink на примере электропоезда переменного тока ЭПЗД. **Ключевые слова:** сглаживающий реактор, моделирование, коэффициент мощности, электропоезд переменного тока, ЭПЗД.

Studies devoted to the urgent task of increasing the energy efficiency of rolling stock are usually performed using computer simulation. One of the most common programs for solving this problem is MATLAB (Simulink). The article discusses the features of modeling of reactor equipment for AC EPS using Simulink tools on the example of an AC electric train EP3D. **Keywords:** smoothing reactor, modeling, power factor, AC electric train, EP3D.

Таблица 1. Парк электропоездов переменного тока

Серия	Электрическое торможение	Годы выпуска	Количество выпущенных секций
ЭР7 (ЭР7К)	-	1960–1962	41
ЭР9	-	1961–1964	226
ЭР9П	-	1963–1974	1429
ЭР9П (№ 345–377)	-	1974–1975	201
ЭР9М	-	1976–1983	546
ЭР9Е	-	1981–1987	407
ЭР9Т	Реостатное	1987–1996	371
ЭД9Т	Реостатное	1995–2000	132
ЭД9М	Реостатное	2000–2012	855
ЭД9МК	Реостатное	2000–2006	110
ЭД9Э	Рекуперативно-реостатное	2006, 2012–2016	174
ЭПЗД	Рекуперативно-реостатное	с 2016	46

Таблица 2. Технические характеристики ВИП-1000

Номинальное входное напряжение, В (действующее значение)	2208
Пределы изменения входного напряжения, В	от 1670 до 2570
Номинальная частота питающего напряжения, Гц	50
Номинальное выпрямленное напряжение, В (среднее значение)	1660
Максимальное выпрямленное напряжение, В (среднее значение)	1925
Номинальный выпрямленный ток, А	480

Таблица 3. Технические характеристики трансформатора ОДЦЭ-2000/25Б

Типовая мощность трансформатора, кВ·А 2000	2000
Номинальная мощность сетевой обмотки (СО), кВ·А 1652	1652
Номинальное напряжение сетевой обмотки (СО), кВ 25	25
Номинальный ток сетевой обмотки (СО), А 66,1	66,1
Номинальная мощность тяговой обмотки (ТО), кВ·А 1320	1320
Номинальное напряжение тяговой обмотки на выводах (ТО), В 1–4 (1–2) – (1–0) – (1–3) – (1–4)	2200 550–1100–1650–2200
Номинальный ток тяговой обмотки (ТО), А	600

В 1995 году в России было запущено производство пригородных электропоездов серии ЭД9Э, которые должны были обеспечить замену парка выпускавшихся ранее электропоездов переменного тока, выработавших свой срок службы (таблица 1). В связи с введением в действие в 2014 году технического регламента Таможенного союза «О безопасности подвижного состава» электропоезд ЭД9Э подвергся модернизации и стал выпускаться в соответствии с новой системой обозначения как электропоезд ЭПЗД, при этом принципиальная силовая схема (рис. 1) не подверглась значительным изменениям.

Главным отличием этих поездов по сравнению с поездами серий ЭР9в и ЭД9М стало применение системы зонно-фазового регулирования напряжения тяговых электродвигателей. Для этого на электропоезда устанавливается выпрямительно-инверторная установка ВИП-1000, которая получает питание от понижающего тягового трансформатора ОДЦЭ-2000/25.

Технические характеристики выпрямительно-инверторного преобразователя ВИП-1000 и трансформатора ОДЦЭ-2000/25Б приведены в таблицах 2 и 3 [1].

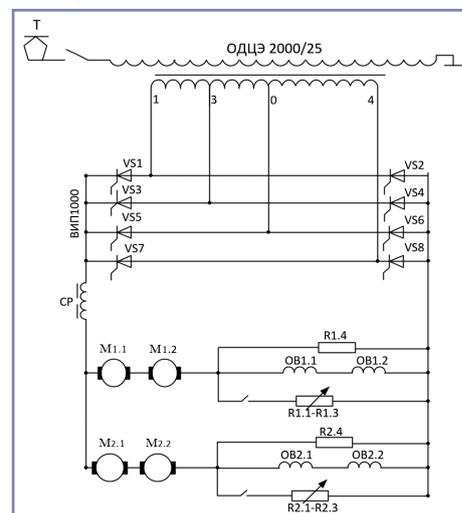
Для уменьшения пульсаций выпрямленного тока и ограничения амплитуды тока короткого замыкания, протекающего в цепи выпрямителя, в силовой цепи предусмотрен сглаживающий реактор (СР).

Известно, что при синусоидальной форме полупериода выпрямленного напряжения величину пульсаций тока можно определить по формуле

$$\Delta I = \frac{\sim U}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c (L_d + L_{cp})}, \quad (1)$$

где $\sim U$ – переменная составляющая напряжения, равная амплитуде вторичного напряжения U_{2m} ;
 $f_c = 50$ Гц – частота напряжения контактной сети;

Рис. 1. Принципиальная схема силовых цепей



$L_d + L_{cp}$ – суммарная индуктивность тяговых двигателей и сглаживающего реактора. Выражение справедливо при условии, что активное сопротивление цепи пренебрежимо мало.

В качестве тяговых электродвигателей на моторных вагонах применяются коллекторные двигатели ТЭД-3 У1 ТУ 3355–108–05757908 (согласно ТУ) или 1ДТ.003.11 У1 ТУ ЛР.000.304.200.009 (согласно ТУ и РЭ), для которых величина тока якоря ограничена значением 450 А. Коэффициент пульсаций тока ТЭД согласно ТУ должен быть не более 0,26. Номинальное напряжение тяговой обмотки трансформатора ОДЦЭ-2000/25Б на выводах 1–4 (четвертая зона регулирования) составляет 2200 В. В соответствии с выражением (1) определим величину индуктивности сглаживающего реактора для четвертой зоны регулирования: $L_{cp} + 30$ мГн. Чтобы обеспечить необходимую величину индуктивности, на выходе выпрямительно-инверторного преобразователя ВИП-1000 устанавливаются сухие сглаживающие реакторы РСС-280–0,017 У1 (6 ед). Технические характеристики реактора [2] приведены в таблице 4.

Комплект сглаживающих реакторов устанавливается на крыше электропоезда (рис. 2) [3]. Силовой схемой предусмотрено последовательное подключение трех сглаживающих реакторов к каждой группе из двух тяговых двигателей.

Как правило, при номинальном режиме работы принимают $K_{п\text{ном}} = \text{const}$ (рис. 3) [4].

Для поддержания постоянного значения относительной пульсации тока сглаживающий реактор должен обеспечивать изменение индуктивности цепи выпрямленного тока при изменении нагрузки по закону изменения гиперболической функции [5].



Рис. 2. Комплект сглаживающих реакторов, установленных на крыше электропоезда

Таблица 4. Технические характеристики сглаживающего реактора

Индуктивность при токе подмагничивания 60 А, мГн, не менее	17
Индуктивность при токе подмагничивания 280 А, мГн, не менее	10
Номинальный ток, А	280
Номинальное напряжение изоляции относительно корпуса, В	2000
Число витков	34,5

Поскольку при малых нагрузках сглаживающий реактор с сердечником работает на прямолинейном участке кривой намагничивания, где $\frac{d\Phi}{dt} = \text{const}$, то индуктивность реактора $L = \omega \frac{d\Phi}{di}$ (ω – число витков реактора, Φ – магнитный поток реактора, Вб) будет иметь максимальное и конечное значение.

Согласно [5] коэффициент мощности для схемы зонно-фазового регулирования напряжения можно определить по формуле:

$$\chi = \frac{U_{d0} I_d}{U_T I_d k_{d\text{эф}}}, \quad (2)$$

$$\text{где } k_{d\text{эф}} = \sqrt{1 + 0,13 k_{\text{по}}^2}$$

$k_{\text{по}} = \Delta i_d / I_d$ – коэффициент пульсации.

Очевидно, что увеличение коэффициента пульсаций тока оказывает влияние на энергетические характеристики подвижного состава. Именно по этой причине при моделировании электроподвижного состава переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем необходимо учитывать нелинейность индуктивности сглаживающего реактора. Кроме того, как отмечено в [6], при моделировании переходных процессов необходимо учитывать статическую и динамическую (дифференциальную) индуктивность сглаживающего реактора и обмоток двигателей. Динамическая индуктивность зависит от значения тока, однако, согласно [7], броски тока в основном определяются значением индуктивности в начальный момент переходного процесса. Так как токи, протекающие через индуктивности, не могут изменяться мгновенно, то их начальные значения равны значениям, которые они имели непосредственно перед началом переходного процесса. Учесть изменение индуктивностей во время переходного процесса можно, введя дополнительные данные в табличной форме. Численно дифференцируя эти зависимости на каждом шаге интегрирования системы уравнений, можно находить соответствующие значения индуктивностей [8].

Запишем дифференциальное уравнение для сглаживающего реактора:

$$u_{cp} = L_{cp}(i) \frac{di_{cp}}{dt} + i_{cp} r_{cp}. \quad (3)$$

На основании уравнения (3) составим компьютерную модель сглаживающего

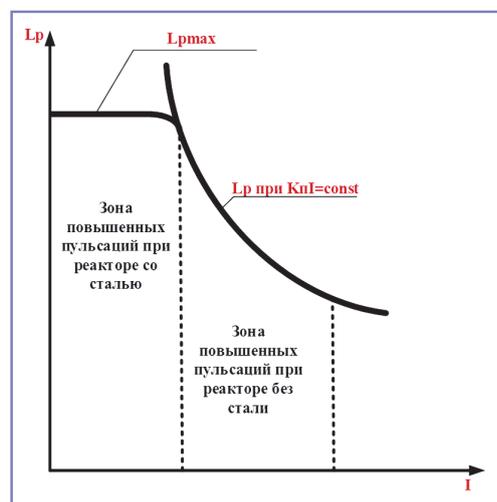
реактора, которая будет представлять собой активно-индуктивную нагрузку, моделирующую электрические параметры реактора при максимальном токе и источник ЭДС, с помощью которого учитывается нелинейность индуктивности реактора. Нелинейность индуктивности реактора можно задать несколькими способами. Например, в работе [9] индуктивность сглаживающего реактора воспроизводится полиномом пятой степени: $L_{cp} = 6.1098e-018 * i^5 - 2.9966e-014 * i^4 + 3.9144e-011 * i^3 + 1.1755e-008 * i^2 - 5.3931e-005 * i + 4.0007e-002$ (рис. 4).

Уравнение (3) воспроизводится следующим алгоритмом: напряжение на сглаживающем реакторе подается на блок Subtract2, где из него вычитается ток якорей ТЭД, перемноженный блоком Divide1 на сопротивление сглаживающего реактора R_{cp} , далее сигнал блока Subtract2 делится блоком Divide2 на величину L_{cp} . Блок Subsystem2 формирует значение L_{cp} как функцию полинома пятой степени. Блок Integrator1 интегрирует сигнал блока Divide2, получая на выходе значение тока сглаживающего реактора [9]. Отметим, что учет нелинейности полинома пятой степени может привести к ошибкам при численных методах решения дифференциальных уравнений, а также не позволяет учесть особенности работы реактора в зоне малых токов ($\frac{d\Phi}{dt} = \text{const}$). Аналогичная методика моделирования нелинейной индуктивности предложена в [10]. Для этого решается дифференциальное уравнение для напряжения на реакторе и составляется уравнение (полином третьей степени), представляющее алгебраическую зависимость между потокосцеплением и током реактора.

Еще одним способом задания нелинейных параметров индуктивности сглаживающего реактора является способ представления функции в табличном виде. Эта функция реализована в Simulink блоком Lookup Table block. Блок поддерживает методы плоской (постоянной), линейной и кубической сплайновой интерполяции. Пример реализации уравнения (3) с помощью табличной функции $L_{cp}(i)$ приведен на рис. 5.

Такая модель позволяет учитывать статическую и динамическую индуктивность сглаживающего реактора. В области малых токов, когда магнитный поток имеет линейную зависимость от тока, динамическая индуктивность постоянна, а в области больших токов она будет снижаться.

Рис. 3. Теоретическая зависимость индуктивности сглаживающего реактора от тока



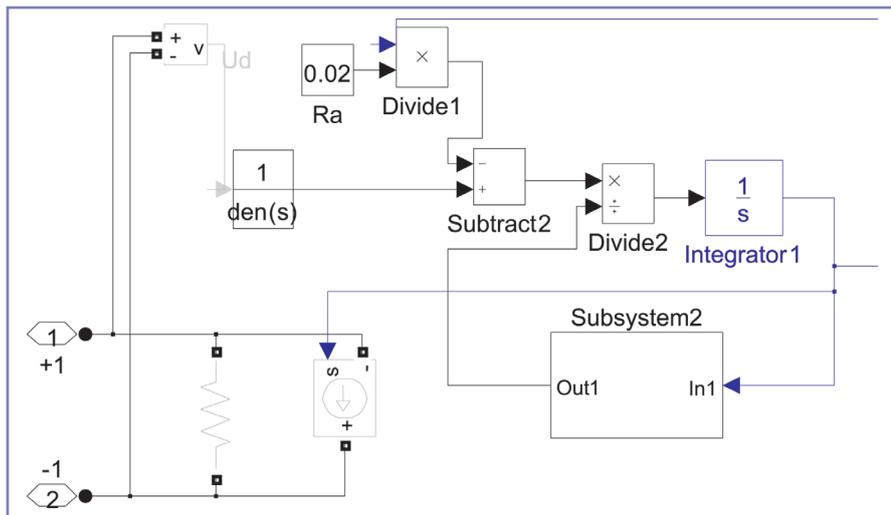


Рис. 4. Компьютерная модель блока сглаживающего реактора

Третий способ моделирования сглаживающего реактора заключается в решении уравнения (3), представленного в следующем виде:

$$u_{cp} = \frac{d\psi}{dt} + i_{cp} r_{cp}; \quad (4)$$

$$u_{cp} = \frac{d\psi}{di} \frac{di}{dt} + i_{cp} r_{cp}. \quad (5)$$

Зная кривую намагничивания, уравнение решается численно: для каждого момента времени определяется величина тока реактора, находится первая производная по времени и первая производная по току для потокосцепления. Производную функции, заданной в табличной форме, определим с помощью стандартных функций MATLAB, а именно функции diff(). В результате получим модель блока сглаживающего реактора, представленную на рис. 6.

Выводы

Коэффициент мощности ЭПС переменного тока с системой зонно-фазового регулирования напряжения зависит от отношения индуктивного сопротивления цепи выпрямленного тока и индуктивного сопротивления цепи переменного тока, поэтому при разработке компьютерных моделей, создаваемых для оценки технических решений, направленных на повышение энергетической эффективности, учитывать нелинейность реакторного оборудования является обязательным условием для получения корректного результата. Учитывать нелинейность можно несколькими способами: с помощью полиномиальной функции, с помощью табличной функции или определять индуктивность через функцию потокосцепления.

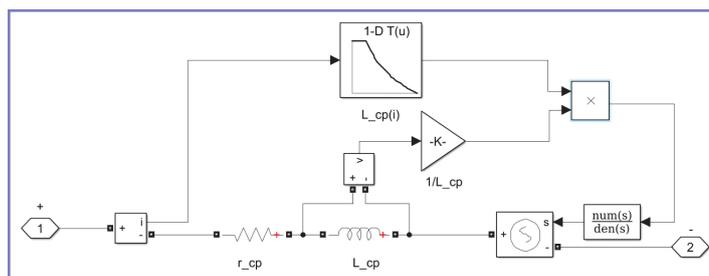


Рис. 5. Модель блока сглаживающего реактора с индуктивностью, заданной табличной функцией

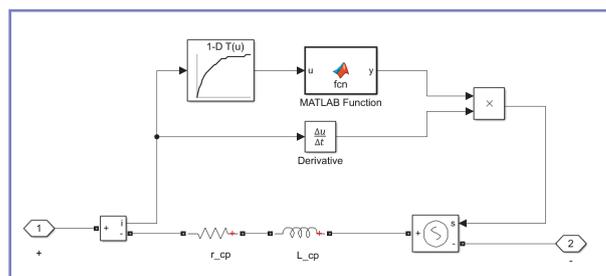


Рис. 6. Модель блока сглаживающего реактора с функцией потокосцепления

Литература

1. Электропоезд ЭП3Д модель 62–382. Руководство по эксплуатации 382.00.00.000 РЭ.
2. Комплект электрооборудования электропоезда ЭД9Э. Книга 1. Руководство по эксплуатации 6БС.391.311 РЭ.
3. Фотография опубликована на сайте <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%949>.
4. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины, Учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
5. Подвижной состав электрифицированных железных дорог / Тихменев Б. Н., Трахман Л. М. – М.: Транспорт, 1980.
6. Алексеев А. С. Исследование влияния нелинейности кривой намагничивания тягового электродвигателя на переходные процессы в силовой цепи электровоза. Труды МИИТ, вып. 912. – М.: МИИТ, 1997. – 104 с.
7. Проектирование тяговых электрических машин [Текст]: [Учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта] / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, М. А. Козорезов, Д. М. Лупкин; Под общ. ред. д-ра техн. наук проф. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1967. – 536 с.
8. Курбасов А. С., Седов В. И., Сорин Л. Н. Проектирование тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
9. Викулов И. П. Усовершенствование алгоритмов управления тяговыми электродвигателями электропоезда переменного тока с зонно-фазовым регулированием. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2009 г.
10. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. – 288 с.

Титова Тамила Семеновна

Окончила Северо-Западный заочный политехнический институт по специальности «Электрические машины». Доктор технических наук, профессор. В 2005 году защитила диссертацию на тему «Комплексная оценка влияния новых природозащитных технологий на геологическую обстановку». Опыт работы – 38 лет. В настоящее время работает первым проректором – проректором по научной

работе, заведующей кафедрой «Техносферная и экологическая безопасность» ПГУПС. Имеет более 200 научных трудов, в том числе 26 монографий и учебников, 44 патента, 13 зарубежных публикаций. Почетный железнодорожник, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

Ролле Игорь Александрович

Родился в 1978 году. В 2002 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Локомотивы». Кандидат технических наук. В 2006 году защитил диссертацию по теме «Повышение ресурса крышек цилиндров тепловозных дизелей». Опыт работы – 17 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 10 научных трудов.

Сычугов Антон Николаевич

Родился в 1986 году. В 2009 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 15 научных трудов.

Серета Александр Геннадьевич

Родился в 1989 году. В 2011 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает инженером на кафедре «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС. Имеет 5 научных трудов.

Titova Tamila

She graduated from North West Correspondence Polytechnic Institute majoring in “Electric machines”. She is a doctor of technical sciences, professor. In 2005 she defended the dissertation with topic “Complex assessment of the impact of new environmental protection technologies to the geological situation”. She has 30 years of work experience. At present she works as the first vice-rector – vice-rector for scientific work, chief of Technospheric and environmental safety department of PGUPS. She has more than 200 scientific works, including 26 monographs and training manuals, 44 patents, 13 abroad publications. She is honored railway employee, honored scientist of Russian Federation.

Rolle Igor

Was born in 1978. In 2002 he graduated from PGUPS majoring in “Locomotives”. He is candidate of technical sciences. In 2006 he defended the dissertation with topic “Increase the service life of cylinder head covers of diesel locomotive engines”. He has 17 years of work experience. At present he works as associate professor of Electric traction department of PGUPS. He has more than 10 scientific papers.

Sychugov Anton

Was born in 1986. In 2009 he graduated from PGUPS with a degree in “Electric transport”. Work experience – 10 years. At present he is an assistant of Electric traction department in PGUPS. He has more than 15 scientific papers.

Sereta Alexander

Was born in 1989. In 2011 he graduated from PGUPS with a degree in “Electric Rail Transport”. Work experience – 8 years. At present he is an engineer at the Electrical engineering and heat power engineering department in PGUPS. He has 5 scientific papers.

Многоканальные системы защиты от юза и боксования для электрического подвижного состава

// Multi-channel systems of protection from skid and slippage for electric rolling stock //

Андреев В. Е.,
ОАО «РЖД», Москва
Изварин М. Ю., к.т.н., доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург
Рязанов Ю. В.,
ООО «НПО «Сатурн», Санкт-Петербург

В статье рассмотрены вопросы создания современных противоюзово-противобоксовочных систем для электрического подвижного состава с двигателями постоянного тока. Использование новых алгоритмов управления позволит выявлять не только юз и боксование при движении, но и заклинивание колесных пар на малой скорости, возникающее из-за нарушения технологии обслуживания в депо. Использование дополнительных каналов получения данных позволяет также повысить надежность системы. **Ключевые слова:** скольжение, крип, боксование, юз, заклинивание, датчик скорости, коэффициент сцепления.

The article discusses the creation of modern anti-skid and anti-slip systems for electric rolling stock with DC motors. The use of new control algorithms will make it possible to detect not only skid and slippage during movement, but also jamming of wheel pairs at low speed, which occurs due to a violation of service technology in the depot. The use of additional data acquisition channels can also increase the reliability of the system.

Keywords: skidding of wheels, creep, slippage, skidding, jamming, speed sensor, adhesive coefficient.

Известно, что скольжение колесных пар по рельсам при качении снижает реализуемое тормозное и тяговое усилие и может привести к повреждению ободьев колес, рельсов, тяговых электродвигателей. Однако без относительного скольжения невозможна реализация силы тяги и тормозной силы. Возникает вопрос – какое скольжение является допустимым, а какое требует вмешательства защиты в работу системы управления для исключения недопустимого явления.

Известно, что величина коэффициента сцепления зависит от скорости проскальзывания колеса по рельсу. Данные процессы были наиболее подробно исследованы в трудах Калкера и подтверждены многочисленными опытными данными [1–3], [5]. Функцией зависимости является коэффициент сцепления, определяемый

как отношение силы тяги/торможения на ободу колес к нагрузке на ось и обозначаемый Ψ_k , а аргументом – абсолютная или относительная скорость скольжения ΔV :

$$\Psi_k = \frac{F_{\text{сц}}}{m_0}, \quad (1)$$

где $F_{\text{сц}}$ – сила тяги на ободу колес колесной пары кгс,

m_0 – нагрузка на ось, кгс.

$$\Delta V = v - \frac{D_k}{2} \cdot \omega = v - v_{\text{кп}}, \quad (2)$$

$$\Delta V' = \frac{(v - \frac{D_k}{2} \cdot \omega)}{v}, \quad (3)$$

где ΔV – абсолютная скорость скольжения;
 $\Delta V'$ – относительная скорость скольжения;
 D_k – диаметр колеса по кругу катания;

v – скорость движения ЭПС;

$v_{\text{кп}}$ – окружная скорость на ободу колеса.

При этом, как правило, рассматриваются две зависимости: для режима тяги и торможения, которые в первоисточниках обозначаются как Slippage (скольжение при боксовании) и Skidding (скольжение при торможении) соответственно.

Вид кривой, описывающей усредненное изменение коэффициента сцепления в зависимости от скорости проскальзывания, приведен на рис. 1.

При изменении Ψ_k от 0 до величины, соответствующей $\Psi_{k_{\text{max}}}$ коэффициент сцепления показывает стабильный рост. После прохождения максимума, соответствующего скорости скольжения 1,4–1,5%, величина коэффициента сцепления начинает уменьшаться. При больших значениях скорости скольжения величина коэффициента сцепления значительно не изменяется. Соотношение $\Psi_{k_{\text{max}}}/\Psi_{k_{\text{min}}}$ может значительно варьироваться в зависимости от текущего состояния колеса и рельса, наличия загрязнений и проч., от 1,3 вплоть до 4 [4].

В последние годы были выполнены исследования, которые показали, что зависимость коэффициента сцепления от скорости зависит от того, развивается скольжение или, наоборот, прекращается. Теоретическое обоснование и вид кривой зависимости коэффициента сцепления от скорости приведены в [3, 5]. Вид кривой зависимости коэффициента сцепления от скорости представлен на рис. 2.

Система противоюзово-противобоксовочной защиты должна учитывать характер данных процессов, притом что расположение точки режима по кривой (рис. 2) желательно выбрать таким, чтобы реализовать максимально возможную тормозную силу или тяговое усилие, не выходя из зоны крипа или, по крайней мере, из зоны скольжения до достижения экстремума кривой (рис. 2).

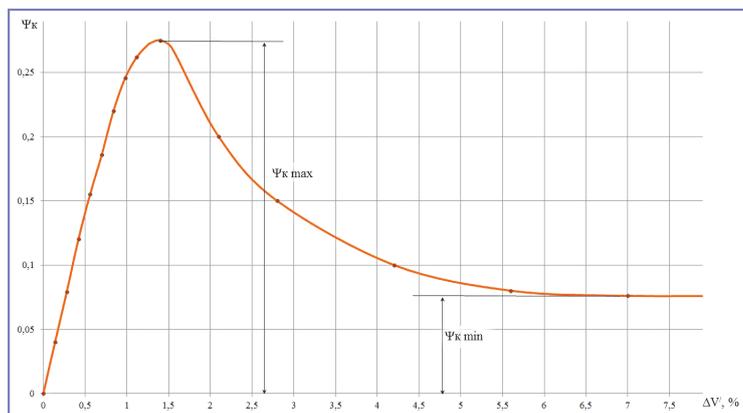


Рис. 1. Вид кривой, показывающей зависимость коэффициента сцепления от скорости скольжения

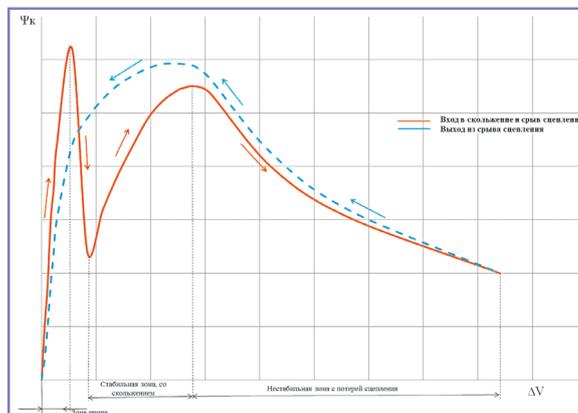


Рис. 2. Характер процессов при срыве и восстановлении сцепления

Так как секция пассажирского электровоза содержит 4 оси, вероятность одновременного синхронного боксования или юза мала. Тогда при работе системы в качестве защиты от боксования в режиме тяги за истинную скорость ЭПС принимается скорость оси с минимальной окружной скоростью колесной пары, а при торможении – с максимальной.

Уравнения движения колесной пары и ЭПС выглядят следующим образом:

$$v = \begin{cases} v, & \text{если } F_{сц} > \frac{2M_k}{D_k} \text{ и } \Delta V < 0,1 \text{ м/с;} \\ v_{нс} + \frac{1}{m_{кшб}} \int \left(\frac{2M_k}{D_k} - F_{сц} \right) \cdot dt, & \text{если } F_{сц} < \frac{2M_k}{D_k}, \\ \text{либо при } \Delta v > \Delta v_{f_m}; \end{cases} \quad (4)$$

где $F_{сц}$ – сила сцепления с учетом кривых (рис. 1 и 2);

$v_{нс}$ – скорость начала скольжения;

M_k – вращающий момент, приведенный к оси колесной пары.

Скольжение колесных пар, возникающее при работе ЭПС, можно классифицировать следующим образом (рис. 3).

Крип представляет собой псевдоскольжение, вызванное деформацией колес и рельсов, и фактически обеспечивает реализацию тяговых и тормозных усилий. При торможении может возникнуть юз, по величине превышающий крип, при котором полной остановки колесных пар не происходит, реализуется наибольшая тормозная сила, однако такое торможение связано с повышенным износом колесных пар. Наибольшую опасность для колесных пар представляет заклинивание колес, при котором образуются ползуны, и может потребоваться ремонт. В практике эксплуатации достаточно часто встречается вид юза, который можно назвать технологическим, и связан он с нарушением работы ЭПС или его неисправностями. Он может возникнуть из-за заклинивания подшипников тягового электродвигателя (ТЭД), редукторов, забытых под электровозом тормозных башмаков, коротких замыканий в схеме и проч.

Разносное боксование свойственно ЭПС с тяговыми электродвигателями постоянного тока последовательного возбуждения, при этом срыв сцепления редко наблюдается на всех осях. Синхронное боксование чаще возникает при использовании ТЭД независимого или смешанного возбуждения либо ТЭД переменного тока.

На большинстве видов ЭПС с двигателями постоянного тока, подлежащих модернизации, установлены релейные либо аналоговые электронные системы защиты от юза и боксования, главным недостатком которых является низкая надежность. В настоящее время многие из таких систем вышли из строя. Поэтому стоит задача создания новой микропроцессорной системы, которая может не только заменить устаревшую, но и обеспечить выявление всех типов юза и боксования, перечисленных выше.

Большинство современных систем контроля скольжения, оборудованных датчиками скорости, двухканальные и сравнивают как скорости колесных пар, так и их ускорения (замедления). При этом принимается, что при нормальном торможении без юза замедление не может быть больше некой критической величины, и любое превышение скорости замедления колесной пары говорит о ее проскальзывании на неустойчивой области кривой сцепления. Японскими учеными разработан

третий вариант, при котором в процессе торможения оценивается время до входа в скольжение с относительной скоростью 100% (т.е. заклинивание) [6].

Кроме того, использование новой противоюзовой системы не исключает применения других каналов измерения. Основной проблемой противоюзовых и противобоксовочных систем считается невозможность прямого измерения скорости проскальзывания, что ограничивает точность вследствие дискретизации импульсного сигнала скорости при применении осевых магнитных и оптических датчиков, особенно на малых скоростях. Из-за этого диапазон работы противоюзово-противобоксовочных систем с осевыми датчиками ограничен минимальной скоростью 5 км/ч. В то же время заклинивание колесных пар даже на такой малой скорости может привести к образованию ползунов, что зачастую происходит при маневровых перестановках из-за неотпущенного ручного тормоза и проч. К перечисленным трем можно получить дополнительно еще как минимум один канал. Такая возможность представляется на ЭПС с двигателями постоянного тока, так как всегда можно измерить напряжения якорей ТЭД. Фактически данный способ не отличается от традиционных реле боксования и юза, но электронные системы измерения обладают более высокой чувствительностью, чем релейные схемы. Кроме того, системы с осевыми датчиками скорости и с анализом напряжения якорей на электровозах работают независимо друг от друга. Если же сделать одну многоканальную систему, появятся новые возможности для улучшения диагностики и повышения надежности.

Поэтому на высокой скорости предпочтительнее использовать импульсные датчики скорости, а на низкой можно определять разницу напряжений. Кроме того, системы, построенные исключительно на основе импульсных датчиков скорости, не могут отличить ряд собственных неисправностей от юза на малой скорости. В большинстве противоюзовых систем ведется постоянный мониторинг состояния датчиков скорости, однако он представляет собой исключительно контроль исправности электрической схемы или обмоток (по току покоя и входному напряжению датчика). При ряде неисправностей, таких как некачественная настройка зазоров после сборки, срыв зубчатого колеса и проч., датчик прекращает формировать импульсы при нормальных величинах

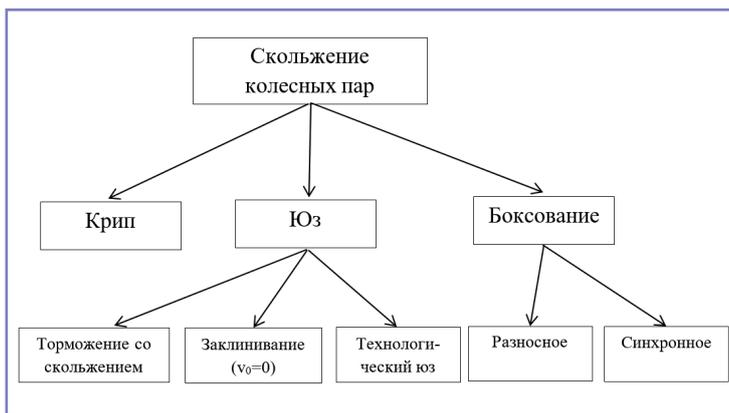


Рис. 3. Классификация скольжения колесных пар.

токов и напряжений. При прекращении поступления импульсов от индукционного или магнитного датчика система автоматически формирует сигнал «V=0» как при реальном юзе, так и при неисправности, что не дает возможности контролировать скольжение. На данном принципе построена система защиты от юза и боксования УПЗ, разработанная НПО «Сатурн» и поставляемая совместно с системой электродинамического торможения, но ее недостатком является невозможность работы в режиме пневматического торможения. Новая система УПЗ-М, предназначенная для модернизации электровозов ЧС7, имеет пневмомодули для отпуска пневматических тормозов при юзе и осевые индукционные датчики скорости.

Если дополнительно к ним предусмотреть канал связи с системой УПЗ, выявляющей юз и боксование за счет анализа напряжений якорей в режимах тяги и ЭДТ, то система будет иметь возможность различать технологический юз и неисправность датчиков скорости, что дополнительно расширит функциональные возможности системы и повысит надежность ЭПС (рис. 4).

При появлении разницы скоростей более 9% или превышении предельного ускорения/замедления система воздействует на силовую схему (сброс тяги или уменьшение тормозной силы) либо на соответствующий пневмомодуль в режиме пневматического торможения.

Появится возможность сделать технологический юз, повысить надежность системы в целом и определять выход из строя осевых датчиков за счет сопоставления напряжений якорей ТЭД и сигналов датчиков скорости. Ветка алгоритма выявления технологического юза в данном случае будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

При скорости на n-оси электровоза, равной нулю, и неравной нулю скорости других осей выполняется сравнение с напряжением ТЭД в режиме тяги. Если напряжение якоря ТЭД также равно нулю, это говорит о технологическом юзе и требует сброса тяги. Если же скорость n-оси равна нулю, а напряжение якорей растет с увеличением скорости, это определяет отсутствие частоты на выходе датчика и требует его отключения с запретом процедур на соответствующих ветках. После этого система сохраняет работоспособность выявления юза и боксования осей с исправными датчиками.

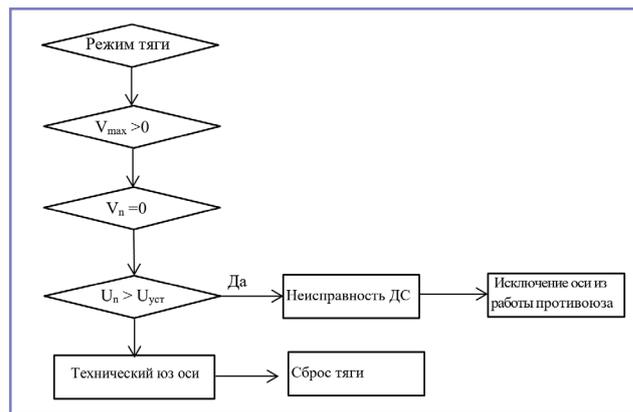
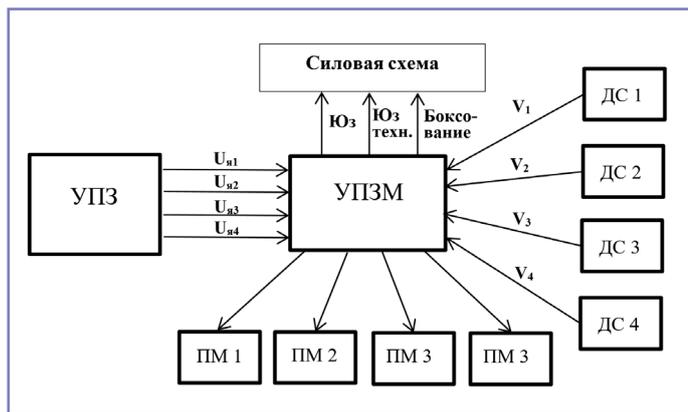


Рис. 4. Структурная схема построения противоюзово-противобоксовочной системы УПЗМ с каналом связи УПЗ:

ДС – датчик скорости; ПМ – пневмомодуль со сбрасывающими клапанами; УПЗ – устройство противобоксовочной защиты на основе анализа напряжения; УПЗМ – устройство противоюзово-противобоксовочной защиты на основе ДС

Рис. 5. Ветка алгоритма выявления технологического юза

Литература

1. J.J. Kalker. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact / Dordrecht [etc.] // Kluwer academic publishers, p. 1990.
2. Identification of a wheel-rail adhesion coefficient from experimental data during braking tests / M. Malvezzi, L. Pugi, S. Papini, A. Rindi, P. Toni // Research article. Интернет-ресурс <https://doi.org/10.1177/0954409712458490>.
3. M. Boiteux. Le problème de l'adhérence en freinage // Revue générale des chemins de fer, 59–72, February 1986.
4. K.-R. Hase et al. Eisenbahntechnische Rundschau, 2005, № 10.– Pp. 599–609.
5. M. Boiteux, M. Cadier, J. Kling, W. Kunnes. Adhérence en freinage et anti-enrayeurs / Document-technique DT257 (B164) // Office de Recherches etd'Essays de L'Union Internationale des Chemins de fer, July 1992.
6. Quarterly report of Railway Technical Research Institute, vol. 52, № 3.– p. 136–140
7. Математическое моделирование режимов электрического рекуперативного торможения электропоезда переменного тока с зонно-фазовым регулированием: доклад / А.С. Корнев, А.Я. Якушев, И.П. Викулов // Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте: Материалы 3-го Межд. симпозиума (СПб., 15–17 ноября 2005 г.).– СПб.: ПГУПС, 2007.– С. 588–593.
8. А.М. Evstafev, Yu.P. Boronenko, M.Yu. Izvarin, V.E. Andreev. A device and algorithm for detecting

the skidding of wheel sets of electric rolling stock Russian Electrical Engineering. October 2017, Vol. 88, Issue 10.– pp. 672–675.

9. Вербек Г. Современное представление о сцеплении и его использовании // Железные дороги мира, 1974, № 4.– С. 23–53.

Андреев Владимир Евгеньевич

Родился в 1970 году. В 1992 году окончил Петербургский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Опыт работы – 26 лет. В настоящее время работает начальником Департамента технической политики ОАО «РЖД».

Изварин Михаил Юльевич

Родился в 1964 году. В 1987 году окончил ЛИИЖТ по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 1998 году защитил диссертацию по теме «Преобразователь для питания бортовых цепей электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 45 научных трудов.

Рязанов Юрий Валерьевич

Родился в 1977 году. В 2001 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий по специальности «Машины и аппараты пищевых

производств». Опыт работы – 23 года. В настоящее время работает генеральным директором ООО «НПО «Сатурн». Имеет 3 патента на полезную модель.

Андреев Владимир

Was born in 1970. In 1992 he graduated from the St. Petersburg Institute of Railway Engineers with a degree in «Electrification of Railway Transport». Work experience – 26 years. At present he works as the head of the Technical policy department of «Russian Railways».

Izvarin Mikhail

Was born in 1964. In 1987 he graduated from Leningrad State Transport University majoring in «Electrification of railway». He is candidate of technical sciences, associated professor. In 1998 he defended the dissertation with topic «Conversion device for power supply of on-board circuits of electric trains of direct current». He has 29 years of work experience. At present he works as associate professor Electric traction department of PGUPS. He has 45 scientific papers.

Ryazanov Yuriy

Was born in 1977. In 2001 he graduated from St. Petersburg State University of Low-Temperature and Food Technologies with a degree in «Machines and apparatuses for food production». Work experience – 23 years. At present he is the general manager of «NPO «Saturn» LLC. He has 3 patents for utility model.

Электротехнический комплекс интеллектуального управления сохранности перевозимых грузов на железнодорожном транспорте

// Electrotechnical complex of intellectual management of safety of transported goods by railway //

**Зайцев А. А., д.э.н., профессор, Крылов А. В.,
Урушев С. В., д.т.н., профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург
Ромен Ю. С., д.т.н., профессор,
АО «ВНИИЖТ», Москва**

Транспортные системы должны обеспечить безопасность для пассажиров и грузов, энергоэффективность, экономичность. При непрерывном росте скорости подвижного состава, удлинении маршрутов следования грузов, повышении стоимости их перевозки возрастают требования к системам контроля за состоянием груза и подвижного состава. На сегодняшний день в эксплуатации отсутствуют электротехнические комплексы, позволяющие осуществлять непрерывный мониторинг базовых параметров перевозочного процесса, включая сохранность перевозимых грузов. Создание такого комплекса позволит повысить безопасность и эффективность перевозок за счет минимизации влияния человеческого фактора на проводимые операции, оперативной передачи информации о местоположении и состоянии подвижного состава и перевозимого груза.

Ключевые слова: транспортные системы, подвижной состав, грузоперевозки, электротехнический комплекс.

Развитие грузовых железнодорожных перевозок обуславливает необходимость создания системы непрерывного контроля состояния подвижного состава и перевозимого им груза в режиме реального времени. В последние годы для защиты интересов государственных и коммерческих структур на федеральном уровне был принят ряд нормативных документов в виде законов, стандартов, внутриведомственных приказов, инструкций, регламентирующих, в частности, использование средств защиты и индикации в различных областях хозяйственной деятельности. Вопросы модернизации отечественной системы пломбирования (механического и электрического) постоянно обсуждаются на международных и межведомственных салонах, конференциях, совещаниях и научно-практических семинарах с участием силовых министерств и основных грузоперевозчиков.

Однако, несмотря на принятые меры, оперативная обстановка в сфере обеспечения сохранности перевозимых грузов остается напряженной. Хищения грузов стали более «интеллектуальными», тщательно продуманными, с применением специально подготовленных технических средств, выявляются подделки пломбировочных устройств, ранее не встречавшиеся в оперативной практике.

Transport systems should provide safety for passengers and goods, energy efficiency, and economy. With a continuous increase in the speed of rolling stock, lengthening of freight routes, an increase in the cost of transported goods, requirements for systems for monitoring the state of cargo and rolling stock increase. To date, there are no electrical complexes in operation that allow continuous monitoring of the basic parameters of the transportation process, including the safety of transported goods. The creation of such a complex will make it possible to increase the safety and efficiency of transportation by minimizing the influence of the human factor on ongoing operations, and the prompt transfer of information about the location and condition of rolling stock and the cargo carried.

Keywords: transport systems, rolling stock, cargo transportation, electrical complex.

В настоящей работе ставится задача создания интеллектуального электротехнического комплекса (ЭК) на основе запорно-

пломбировочного устройства (ЗПУ) для контроля и управления базовыми параметрами перевозочного процесса, к которым относятся:

- защита от несанкционированного доступа к грузу и подвижному составу, которым этот груз перевозится;

- непрерывный контроль функционирования системы защиты, соответствие состояния подвижного состава заданным параметрам;

- прием и передача информации в соответствии с заданным регламентом.

ЭК должен позволять в режиме реального времени предоставлять запрашиваемую информацию, а в критической ситуации самостоятельно принимать решения об оперативной передаче информации.

Создание таких сложных технических устройств для контроля и управления базовыми параметрами перевозочного процесса подразумевает разработку математической модели.

Как механические, так и электрические ЗПУ уже давно активно применяются в международной и отечественной практике грузоперевозок. В системах безопасности объектов ЗПУ обеспечивают выявление криминального вмешательства и защиту от вандализма, а уникальный идентификатор ЗПУ используется в транспортной логистике в качестве универсального информационного ключа для решения логистических задач, учета и контроля транспортных средств (объектов) и грузов, их нахождения, размещения и поиска. На сегодняшний день

Таблица 1. Сравнение характеристик систем опломбирования и контроля состояния подвижного состава и перевозимых им грузов

Характеристики	Традиционные системы на основе только механических ЗПУ	Системы на основе ЭК
Определение местоположения подвижного состава (груза)	Возможно только по запросу в вычислительный центр перевозчика	Возможно текущее определение местоположения и параметров движения (скорость, выполнение графика движения) в реальном масштабе времени с отображением соответствующей информации
Контроль целостности ЗПУ	Визуальный контроль с ручными манипуляциями в пунктах контроля и приемки груза. Факт вскрытия ЗПУ в процессе движения оперативно установить невозможно	Автоматический дистанционный контроль без участия человека на всем маршруте. ЭК фиксирует факт вскрытия ЗПУ и оперативно передает информацию об этом факте по каналам беспроводной связи
Дальность контроля ЗПУ	Визуальный контроль и идентификация ЗПУ на расстоянии 0,5–1,0 м	Дальность контроля не ограничена
Стойкость к подмене, подделке и вскрытию	Определяется техническими параметрами механического ЗПУ	Подделка и вскрытие известными методами практически исключаются
Автоматическая передача информации о состоянии ЗПУ и груза	Информация передается работником станции по станционной связи только по результатам визуального осмотра	Возможна автоматическая передача информации в любое время без ограничений

несколько стран разрабатывают и внедряют устройства, являющиеся прообразом ЭК.

ЭК должен представлять собой устройство, сочетающее функции механического замка, пломбы и уникального обезличенного идентификатора. Сравнение характеристик традиционных систем опломбирования подвижного состава и перевозимых им грузов на основе только механических ЗПУ [1], использующих методы контроля и передачи данных «в ручном режиме» работы человека-оператора, с системой, использующей ЭК, приведены в таблице 1 [2].

Приведенное сравнение характеристик демонстрирует преимущества систем на основе использования ЭК за счет существенного расширения функциональных и логистических возможностей. Использование ЭК для управления базовыми параметрами в перевозочном процессе позволит реализовать потенциальные возможности повышения эффективности процессов перевозок за счет сокращения времени подготовительно-заключительных операций по обработке грузов и оперативного выявления состояний, угрожающих безопасности и надежности перевозочного процесса. Применение ЭК в процессах грузовой и коммерческой работы позволит улучшить условия труда и сократить количество ошибок линейного персонала за счет сокращения ручных операций.

Реализация преимуществ систем на основе ЭК позволяет сформулировать следующие функциональные требования к ЭК [3, 4].

1. Механическое (силовое) и электрическое опломбирование объектов (грузов, транспортных средств) с целью их защиты от несанкционированного доступа за счет механического блокирования элементов объекта и идентификации фактов несанкционированного доступа или попыток такого доступа к элементам объекта на основе:

- создания неразъемной механической запорной конструкции;
- формирования сигналов типа «опломбировано»/«вскрыто».

2. Идентификация объекта опломбирования (субъекта, ответственного за объект опломбирования) с использованием уникального электронного идентификатора.

3. Определение параметров движения объекта опломбирования:

- местоположение;
- скорость;
- ускорение;
- маршрут следования.

4. Запись информации об объекте опломбирования во внутреннюю энергонезависимую память и ее хранение до очередного сеанса связи.

5. Взаимодействие с внешними (по отношению к объекту опломбирования) устройствами связи для передачи и приема информации.

6. Возможность опроса датчиков, установленных на объекте опломбирования, запись полученной от них информации во внутреннюю энергонезависимую память и ее хранение до очередного сеанса связи.

Проведенный анализ имеющихся в настоящее время образцов ЭК показывает, что к наиболее перспективным следует отнести ЭК с моноблочной конструкцией и гибким фиксирующим элементом канатного типа – тросом. Базовым (несущим) элементом такой конструкции является корпус, внутрь которого помещен

запорный механизм с тросом и вмонтирован электрический модуль с источником питания.

На рис. 1 приведена конструкция ЭК.

Основными параметрами, определяющими расстояние приема информации из электрического модуля ЭК (и соответственно передачи информации в электрический модуль ЭК), являются несущая частота электромагнитного сигнала и выходная мощность передатчика. Помимо расстояния при выборе соответствующей технологии беспроводной связи необходимо учитывать такие параметры, как помехозащищенность и электромагнитная совместимость, а также предоставляемую технологией скорость передачи данных.

На основании технических требований к ЭК на рис. 2 приведены структура и состав ЭК: в левой части рисунка представлен общий вид ЭК, в правой – функциональная схема ЭК.

В головной части корпуса 1 выполнены гнездо 2 для установки механического ЗПУ 3 и сквозные каналы 4 и 5, предназначенные для пропуска гибкого троса 6 и формирования его запорной петли в процессе опломбирования. В хвостовой части корпуса 1 выполнен сквозной канал 7 для пропуска пассивного конца троса 6.

Внутри корпуса 1 размещен ЭМ с компонентами, обеспечивающий функции определения координат местоположения ЭК, прием, обработку, хранение и передачу информации о параметрах движения ЭК и текущем состоянии троса 6 («замкнуто»/«разомкнуто»/«попытка внешнего воздействия»).

ЭМ формирует электромагнитный сигнал, принимаемый внешним приемопередающим устройством системы связи с последующей передачей информации на диспетчерский

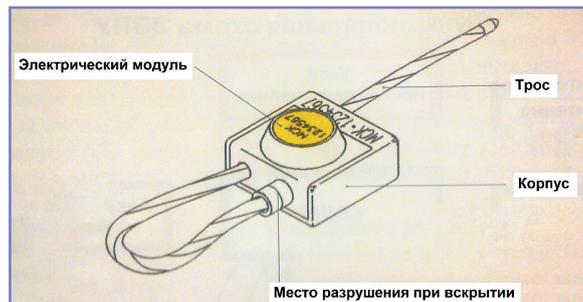


Рис. 1. Конструкция ЭК

пункт (ситуационный центр), пункты отправления и доставки опломбированных грузов.

Контроль текущего состояния троса 6 в процессе транспортировки опломбированного груза выполняется электронным блоком контроля троса, который включает в себя генератор импульсных сигналов с экспоненциальными передним и задним фронтами и последовательно связанными между собой детектором 10, пороговым устройством 11 (выполненным в виде аналого-цифрового преобразователя), исполнительным устройством 12 и микропроцессором (контроллером) 13.

В сквозных каналах 4, 5, 7 располагаются катушки индуктивности 14 и 15, намотанные на кольцевых ферритовых сердечниках. Катушки индуктивности 14 и 15 могут размещаться как в двух разных каналах (4 и 5, 4 и 7, 5 и 7), так и в каком-либо одном канале (4, 5, 7).

Схема установки механического ЗПУ 3 в гнезде 2 и организация механического закрепления крышек 8 и 9 позволяют исключить несанкционированное вскрытие крышек без размыкания петли троса 6. Одновременно исключается возможность несанкционированного доступа к механизму запирающего механического ЗПУ 3 через конструктивные зазоры между тросом 6 и корпусом механического ЗПУ 3, а также к месту заделки троса 6 в корпусе механического ЗПУ 3.

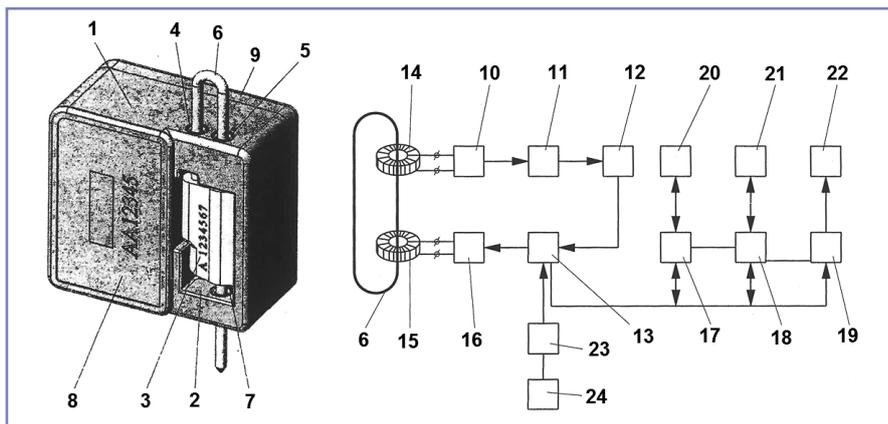


Рис. 2. Структура и состав ЭК:

1 – корпус; 2 – гнездо для установки механического ЗПУ; 3 – механическое ЗПУ; 4 – сквозной канал в корпусе; 5 – сквозной канал в корпусе; 6 – гибкий токопроводящий трос; 7 – сквозной канал в корпусе; 8 – крышка отсека электропитания; 9 – крышка ЭМ; 10 – детектор; 11 – пороговое устройство; 12 – исполнительное устройство; 13 – микропроцессор (контроллер) с энергонезависимой памятью; 14 – катушка индуктивности; 15 – катушка индуктивности; 16 – генератор импульсных сигналов; 17 – приемопередатчик подвижной связи стандарта GSM/GPRS; 18 – приемопередатчик беспроводной связи малого радиуса действия стандарта ZigBee; 19 – приемопередатчик спутниковой связи системы Iridium; 20 – антенна приемопередатчика подвижной связи стандарта GSM/GPRS; 21 – антенна приемопередатчика беспроводной связи малого радиуса действия стандарта ZigBee; 22 – антенна приемопередатчика спутниковой связи системы Iridium; 23 – приемник сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS; 24 – антенна приемника ГНСС ГЛОНАСС/GPS

По команде микропроцессора (контроллера) 13 генератор импульсных сигналов 16 подает на обмотку катушки индуктивности 15 сигнал, который с помощью электромагнитной индукции наводит на обмотке катушки индуктивности 14 вторичный сигнал наведенной электродвижущей силы, параметры которого зависят от наличия замкнутой или разомкнутой петли троса 6 внутри сердечников индуктивно связанных катушек индуктивности 14 и 15, а также от размеров и формы замкнутой петли.

Далее сигнал преобразуется (выпрямляется) детектором 10 и через пороговое устройство 11 (выполненное в виде аналого-цифрового преобразователя) поступает в исполнительное устройство 12, которое анализирует параметры электродвижущей силы в соответствии с программой по различным критериям. Результаты анализа характеристик сигнала являются основой для принятия решения о текущем состоянии троса 6 («замкнуто»/«разомкнуто»/«попытка внешнего воздействия») в соответствии с программой, заложенной в микропроцессор (контроллер) 13, и последующей передачи полученной информации в ЭМ и далее – в радиозфир.

В корпусе 1 дополнительно размещены приемопередатчик подвижной связи стандарта GSM/GPRS17 (оснащен антенной 20), приемопередатчик беспроводной связи малого радиуса действия стандарта ZigBee 18 (оснащен антенной 21), приемопередатчик спутниковой связи системы Iridium 19 (оснащен антенной 22), подключенные к микропроцессору (контроллеру) 13. Также ЭК оснащен приемником сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS23 с антенной 24.

Элементы 17 и 20, а также 19 и 22 предназначены для организации связи с диспетчерским пунктом (ситуационным центром). Элементы 18 и 21 позволяют осуществлять взаимодействие с внешними приемопередатчиками устройствами систем связи путем передачи сигналов на устройства получения и обработки от них информации. В зависимости от решаемой задачи в качестве датчиков могут использоваться датчики температуры, давления, влажности, изменения объема жидкости и т.п. Полученная от датчиков информация передается на диспетчерский пункт (ситуационный центр) при помощи элементов 17 и 20 или элементов 19 и 22.

Алгоритм реализации функции контроля состояния троса основан на использовании фильтров с конечной импульсной характеристикой – КИХ-фильтров или FIR-фильтров (finite impulse response – «конечная импульсная характеристика»), характерной особенностью которых является ограниченность по времени (конечность) их импульсных характеристик [5]. КИХ-фильтр является нерекурсивным (то есть без обратной связи), принцип его действия (вычисление выходного отсчета $y(k)$) основан на суммировании некоторого количества входных отсчетов $x(k-i)$ и умножении их на постоянные весовые коэффициенты b_i в соответствии с выражением

$$y(k) = \sum_{i=0}^m b_i x(k-i), \quad (1)$$

где m – это порядок КИХ-фильтра.

Импульсную характеристику КИХ-фильтра $h(k)$ можно определить, подставив в выражение (1) в качестве входного сигнала единичный импульс $x_0(k)$ и получив при этом следующее выражение:

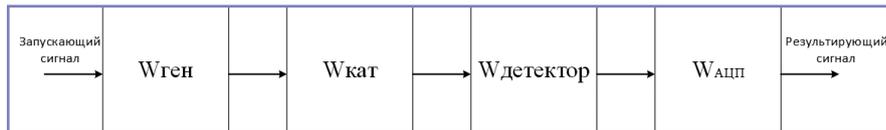


Рис. 3. Структурная схема

$$h(k) = \sum_{i=0}^m b_i x_0(k-i). \quad (2)$$

Однако отсчет $x_0(k-i)$ равен нулю для всех k , кроме $k = i$, когда он равен единице. Таким образом, получаем итоговое выражение (3):

$$h(k) = b_k \quad (3)$$

которое свидетельствует о том, что коэффициенты b_i представляют собой отсчеты импульсной характеристики КИХ-фильтра. То есть при подаче на вход КИХ-фильтра единичного импульса он будет перемещаться по линии задержки, содержащей конечное число элементов (отсюда и конечность импульсной характеристики КИХ-фильтра), умножаться на коэффициенты и проходить выход КИХ-фильтра.

По событию наличия троса в системе ЭМ включается и проводит калибровку датчика контроля целостности троса. Если не удалось произвести калибровку, то ЭМ сигнализирует красным свечением светового индикатора в течение пяти секунд об ошибке. Если калибровка произведена успешно, ЭМ переходит в режим активации и сигнализирует об этом зеленым мерцанием светового индикатора до окончания активации.

Для данного ЭК возможны два случая:

- трос замкнут, катушки индуктивности с тросом образуют импульсный трансформатор;

- трос разомкнут или отсутствует, катушки индуктивности взаимодействуют друг с другом согласно явлению самоиндукции.

Входными параметрами для модели являются:

- длительность аналогового импульсно-го сигнала;
- напряжение питания;
- индуктивности катушек;
- активные сопротивления образующегося трансформатора;
- сопротивление нагрузки трансформатора;
- магнитная проницаемость троса;
- эффективная площадь поперечного сечения троса.

Изменяемыми параметрами являются:

- коэффициент передачи амплитудного детектора;
- уровень амплитудного спектра за пределами полосы частот, определяющей ширину спектра;
- период квантования аналого-цифрового преобразователя (далее – АЦП);
- эффективный путь магнитной линии сердечника;
- длина воздушного зазора.

Выходными параметрами являются наборы двоичных кодов, определяющих состояние троса. Оба эти случая различаются токами и напряжениями, создаваемыми в катушке 14 при подаче импульсного сигнала на катушку 15. Соответственно на детектор будут поступать различные сигналы, а после их аналого-цифрового преобразования исполнительное устройство

сможет определить текущее состояние троса на основе сравнения входных параметров с заданными, соответствующими замкнутому и неповрежденному состоянию троса, и передать данный сигнал в микропроцессор для трансляции посредством антенн. Таким образом, структурная схема, являющаяся графическим изображением математической модели в виде звеньев, имеет вид (рис. 3).

Общая передаточная функция системы может быть записана следующим выражением:

$$W(p) = W_{\text{ген}}(p) * W_{\text{кат}}(p) * W_{\text{детектор}}(p) * W_{\text{АПЧ}}(p). \quad (4)$$

Математическая модель данного ЭК с учетом значений передаточных функций системы:

$$W(p) = -\frac{E}{p} \left(e^{p\frac{\tau}{2}} - e^{-p\frac{\tau}{2}} \right) * \left(-\frac{K\tau p}{(T_1+T_2)p+1} \right) * \frac{k}{p} * \frac{1-e^{-Tp}}{p}. \quad (5)$$

Таким образом, разработана математическая модель расчета ЭК, на основе которой, задавая входные значения и меняя влияющие параметры, можно получать возможные комбинации выходных кодов, соответствующие разному состоянию троса.

Выводы

1. На основании проведенного анализа выявлена необходимость конструктивного состава ЭК в виде двух модулей – механического и электрического – обеспечивающих, соответственно, механическое (силовое) и электрическое опломбирование объекта на основе формирования сигналов типа «опломбировано»/«вскрыто».
2. В состав электрического модуля ЭК должны входить программируемый элемент, элемент энергонезависимой памяти (для записи, хранения и передачи уникального электронного идентификатора), приемник сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (для определения местоположения и параметров движения подвижного состава), приемопередатчик беспроводной связи разных систем (для обеспечения возможности организации связи при любом местоположении).
3. Предложена математическая модель работы ЭК.
4. Для обеспечения работы ЭК необходимо наличие внешней инфраструктуры в составе мобильного рабочего места приемодатчика с соответствующим программным обеспечением, систем связи, диспетчерского пункта (ситуационного центра) с базой данных, личного кабинета пользователя.
5. Возможна перспектива совмещения ЭК с существующими и проектируемыми системами обеспечения безопасности и надежности перевозочного процесса для повышения эффективности и безопасности перевозок.

Литература

1. Дильдин Ю.М. Классификация пломбировочных устройств на основе количественных показателей криминальной стойкости / Ю.М. Дильдин, Е.Ю. Сеницын, А.В. Ермилов, А.В. Крылов, А.Г. Сухарев // Судебная экспертиза, 2008, № 4. – С. 24–31.
2. Ермилов А.В. Плюсы электронного мониторинга / А.В. Ермилов // Мир безопасности, 2013, № 9. – С. 66–68.
3. Зайцев А.А. Инновационные технологии для транспортной системы Российской Федерации / А.А. Зайцев, А.В. Крылов, В.Ф. Юдкин // Русский инженер, 2017, № 4. – С. 75–79.
4. Крылов А.В. Инженерные решения в области энергоэкономичности и безопасности инновационной транспортно-логистической системы / А.В. Крылов // Тезисы докладов VIII международного симпозиума «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Элтранс-2015). – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 28–30.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

Зайцев Анатолий Александрович

В 1965 году окончил Ленинградский институт инженеров транспорта. Доктор экономических наук, профессор. В 1996 году защитил диссертацию по теме «Экономическая стратегия управления железными дорогами». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время является руководителем Научно-образовательного цен-

тра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок ПГУПС.

Крылов Алексей Викторович

Окончил МГТУ в 1996 году. В настоящее время является аспирантом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС.

Урушев Сергей Викторович

В 1968 году окончил Ленинградский электротехнический институт по специальности «Гирскопические приборы и устройства». Доктор технических наук, профессор. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Разработка ресурсосберегающих технологий ремонта колес железнодорожного подвижного состава». Опыт работы – 54 года. В настоящее время работает профессором кафедры «Технология металлов» ПГУПС. Имеет 198 научных публикаций.

Ромен Юрий Семенович

Родился в 1934 году. В 1958 году окончил Харьковский политехнический институт по специальности «Динамика и прочность машин». Доктор технических наук, профессор. В 1986 году защитил диссертацию по теме «Методы расчетов динамических процессов в подвижном составе с учетом неровностей железнодорожного пути в эксплуатации». Опыт работы – 61 год. В настоящее время работает главным научным сотрудником ОА «ВНИИЖТ». Имеет более 87 научных публикаций.

Zaytsev Anatoliy

In 1965 he graduated from Leningrad Institute of Railway Engineers. Doctor of economics, profes-

sor. In 1996 he defended his thesis on the topic “Economic strategy of railway administration”. Work experience is more than 50 years. At present he works as the chief of Research and educational centre of innovation development of passenger rail travel of PGUPS.

Krylov Alexey

He graduated from Russian State Technological University named after Tsolkovsky in 1996. At present he is a postgraduate student of chair for “Electric traction” of PGUPS.

Urushev Sergey

In 1968 he graduated from Saint Petersburg Electrotechnical University with a degree in “Gyroscopic instruments and equipment”. Doctor of engineering sciences, professor. In 2000 he defended his thesis on the topic “Development of alternative technology of railway rolling stock tyre fitting”. Work experience is 54 years. At present he works as a professor at the Department of metal technology of PGUPS. He has 198 scientific publications.

Romen Yuriy

Was born in 1934. In 1958 he graduated from the Kharkov Polytechnic Institute, with a degree in “Dynamics and Strength of Machines”. Doctor of technical sciences, professor. In 1986 he defended his thesis on the topic “Methods of calculation of dynamic processes in rolling stock, taking into account the irregularities of the railway track in operation”. Work experience – 61 years. At present he is a chief scientific employee of VNIIZHT JSC. He has over 87 scientific publications.

Основные направления повышения энергоэффективности моторвагонного подвижного состава

// The main directions of increasing the energy efficiency of rolling stock //

Евстафьева М. В., Изварин М. Ю., к. т. н., доцент,
Васильев В. А., к. т. н.,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Рассматриваются возможности снижения удельного энергопотребления моторвагонного подвижного состава с повышенным удельным расходом электроэнергии из-за эксплуатационных и конструктивных особенностей используемой системы рекуперативного торможения. Выполнен анализ изменения удельного расхода электроэнергии на тягу для различных серий электропоездов постоянного тока. Определены факторы, влияющие на потери в электрических цепях ЭПС при движении поезда на электрической тяге. Предложены мероприятия по повышению энергоэффективности электрического моторвагонного подвижного состава.
Ключевые слова: энергоэффективность, моторвагонный подвижной состав, удельный расход электроэнергии, удельное энергопотребление.

Повсеместное повышение стоимости энергоресурсов, сочетающееся одновременно с большим количеством изобретений и инноваций в области альтернативной энергетики и гибридных технологий, определяет несколько наиболее важных направлений развития электрического моторвагонного подвижного состава, связанных с повышением его энергоэффективности [1–4]. В РФ для оценки потребления и потерь электроэнергии можно использовать статистические данные, полученные в различных исследованиях, доступную статистику ОАО «РЖД», данные Росстата и результаты энергоаудитов.

График изменения удельного расхода электроэнергии на тягу электропоездов по сети дорог приведен на рис. 1. Анализируя данный

The article discusses the possibility of reducing the specific energy consumption of rolling stock with increased specific energy consumption due to the operational and structural features of the used regenerative braking system. The analysis of changes in the specific energy consumption for traction for various series of direct current trains has been performed. The factors affecting the losses in the electric circuits of EMU during the movement of the train on electric traction are determined. Measures are proposed to increase the energy efficiency of electric rolling stock.
Keywords: energy efficiency, EMU, specific energy consumption, specific energy consumption.

график, можно отметить значительное увеличение удельного расхода электроэнергии на тягу моторвагонных электропоездов. Если общее удельное энергопотребление год от года снижается, то для моторвагонного подвижного состава картина обратная. Увеличение удельного энергопотребления связано непосредственно с заменой парка электропоездов: если до конца 1990-х годов основным типом электропоезда на железных дорогах был ЭР2, то в 2004–2010 годах

произошла замена этой серии на электропоезда с рекуперативно-реостатным торможением ЭД4 и ЭД4М. Низкая техническая скорость на пригородных участках и конструктивно несовершенная система рекуперации привели к тому, что ожидаемого эффекта от рекуперации получено не было. Некоторое снижение удельного энергопотребления отмечено начиная с 2015 года, что связано с широким внедрением электропоездов с асинхронным приводом на Московском и Петербургском узлах.

Для успешного прогнозирования новых систем тягового подвижного состава необходимо четко знать, какой эффект можно получить от того или иного мероприятия. Потери энергии при движении поезда на электрической тяге зависят от большого количества факторов. Распределение тяговой энергии для электрической, преимущественно моторвагонной, тяги представлено на диаграмме (рис. 2).

Таблица 1. Потери энергии в системе электрической тяги

Место	Количество
Инфраструктура внешнего энергоснабжения	до 10%
Преобразователи и трансформаторы подстанций	» 5%
Питающие линии и фидеры	» 5%
Тяговая сеть	» 1-5%
Энергия торможения:	50%
потери в тормозах;	20-40%
рекуперация	10-30%
Потери в электрических цепях ЭПС:	10-15%
на вспомогательные нужды;	20-25%
омические потери в проводниках	15-20%
Тяговые двигатели	30-40%
Статические преобразователи	10-15%
Преодоление сопротивления движению	10-30%

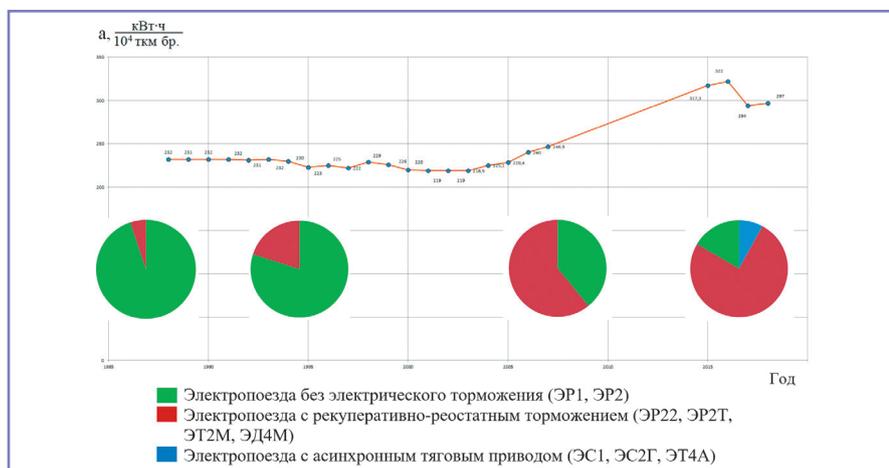


Рис. 1. График изменения удельного расхода энергии на тягу электропоездов

Приближенная оценка значений потерь энергии в системе электрической тяги представлена в виде таблицы 1.

Исследование выполнялось в 2010–2013 годах с использованием статистических данных о работе различных железнодорожных линий, использующих электрическую тягу. Для электрической тяги характерны потери при преобразовании высокого напряжения единой энергетической системы в напряжение контактной сети, как в фидерах, так и в трансформаторах тяговой подстанции [5]. При питании тягового привода поезда от контактной сети электроэнергия снова преобразуется, при этом часть ее также теряется. Некоторое количество энергии используется для питания нетяговых потребителей в поезде для поддержания комфорта пассажиров: отопления, вентиляции, кондиционирования (HVAC) и освещения. Большая часть этой энергии требуется для отопления



Рис. 2. Распределение тяговой энергии

и охлаждения и может значительно варьироваться в зависимости от особенностей климата, а в экстремальных условиях составляет до 80%. Преодоление сопротивления движению потребляет дополнительную энергию, составляющую от 10% до 30% от общего потребления энергии.

Аэродинамическое сопротивление увеличивается пропорционально квадрату скорости, таким образом, для движения на более высоких скоростях требуется больше энергии. Сопротивление движению и торможение можно рассматривать совокупно как потери энергии, которые будут варьироваться в зависимости от стиля вождения, скорости движения и количества остановок. Обычно до 50% энергии тяги рассеивается в процессе торможения. Однако при использовании электрической тяги возможно осуществлять рекуперацию, что может значительно снизить данные потери за счет возврата подачи энергии обратно в контактную сеть. Из контактной сети переменного тока значительная часть энергии может быть возвращена непосредственно в энергосистему. Потери в тяговом приводе зависят от того, какого типа этот привод: постоянного или переменного тока.

Компании-операторы пассажирских перевозок, использующие моторвагонный подвижной состав, сталкиваются с необходимостью снизить энергопотребление для достижения целевых показателей эффективности деятельности по обеспечению перевозок пассажиров. С этой целью имеющиеся технологии рассматриваются и классифицируются в зависимости от того, в какой области электрической тяги они могут быть использованы.

Отчеты Европейского союза показывают, что железнодорожная отрасль по-прежнему имеет значительное потребление энергии [6].

Использование энергии на тягу поездов составляет наибольшую часть (от 60% до 80%) от общего ее потребления на железнодорожном транспорте. Успешная реализация мер по энергосбережению зависит от участка, характеристик подвижного состава, графика движения и системы электроснабжения. Таким образом, выявление особенностей участков является ключевым шагом в определении того, какие характеристики влияют на успешность применения конкретных технологий.

Собственные нужды

Общее энергопотребление вспомогательного оборудования поезда в значительной мере зависит от режима эксплуатации и климатических условий и может значительно

изменяться в течение года. Для местных перевозок оно обычно составляет от 10 до 20% от общего энергопотребления, а в высокоскоростном движении – примерно 20%. В метрополитене расход энергии на собственные нужды может доходить до трети от полного расхода, при этом высокое энергопотребление связано с климатическими условиями в туннелях, из-за чего увеличивается потребность в вентиляции и кондиционировании воздуха вследствие более высоких температур. По мнению большинства экспертов, потребление энергии устройствами, обеспечивающими комфорт пассажиров, требует около 20% от общих энергозатрат и зависит от времени работы оборудования, поэтому перевозка на более высокой скорости, сокращающая время в пути, снижает расход энергии.

Так как большая часть энергии собственных нужд тратится на отопление, кондиционирование и вентиляцию поезда, выбор оптимальной температуры в вагонах (некоторое снижение в холодное время года) может сократить расход на отопление до 30%.

Повышение внешней температуры оказывает негативное влияние на потребление энергии системой HVAC. Умелое использование рециркуляции воздуха позволяет существенно снизить потребление энергии системой кондиционирования. Баланс между поступлением свежего воздуха и рециркуляцией можно обеспечить при установке интеллектуальной системы управления, оборудованной датчиками углекислого газа. При использовании таких систем снижение потребления электроэнергии на кондиционирование составляет от 10% до 20%.

Дополнительную экономию обеспечивает расчет оптимального количества дверей в поезде, автоматизация управления ими и уменьшение интенсивности вентиляции при открытых дверях. Использование предварительно охлажденного отработанного воздуха из вагона для охлаждения конденсаторов HVAC также может дополнительно уменьшить энергопотребление. В случае, когда температура окружающей среды ниже внутренней, работа холодильной установки кондиционера может быть приостановлена, а в пассажирских вагонах произойдет естественное охлаждение за счет притока внешнего воздуха. Модернизация оборудования HVAC также может снизить потребление, однако данный способ является затратным и желательнее связать его с капитальным ремонтом электропоезда. Особенно эффективна модернизация

для поездов, имеющих устаревшие системы, в этом случае синергический эффект будет еще выше за счет снижения числа отказов и уменьшения массы.

Потребление на освещение вагонов, как правило, составляет лишь небольшой процент от общего потребления энергии – обычно менее 2%. Тем не менее его можно значительно сократить, особенно на наземных линиях, уменьшив степень освещенности до приемлемого для пассажиров уровня, применив выборочное освещение в зависимости от заполненности поезда и управление светом с учетом естественного освещения из окружающей среды. Использование более эффективных источников света, таких как светодиоды, вместо люминесцентных ламп и ламп накаливания также может снизить первоначальное потребление.

Этот метод имеет дополнительное преимущество, заключающееся в снижении тепловыделения от освещения и, следовательно, снижении потребности в кондиционировании воздуха. Также имеется потенциальная экономия за счет управления вспомогательным оборудованием поездов, находящихся в отстое. Перед выходом на маршрут поезда необходимо предварительно подогреть в течение короткого промежутка времени для обеспечения комфорта пассажиров, однако практика показывает, что отопление в отстое полностью не отключается (это более характерно для подвижного состава с комбинированным водяным отоплением в вагонах локомотивной тяги). В данном случае как альтернатива может быть рассмотрен вопрос об отказе от жидкостного отопления либо переход на использование антифризов.

Эффективная теплоизоляция также может снизить энергопотребление путем минимизации теплопередачи внутри и снаружи поезда. Эти технологии включают в себя выбор подходящих материалов для теплоизоляции стен, конструкции и материалов дверей, окон, полов и потолков.

Эффективность тягового привода

Потери в тяговом электроприводе составляют от 10% до 15% от общего тягового энергопотребления [7]. В системе электрической тяги переменного тока напряжение питания должно быть понижено, прежде чем он может быть использован в тяговом приводе. На постоянном токе этого не требуется. В любом случае энергия проходит через электронный преобразователь, который преобразует электрическую энергию в необходимый вид для работы тягового привода переменного или постоянного тока. При этом часть энергии теряется в силовых компонентах преобразователя. Значительно снижают энергоэффективность потери во вспомогательных цепях, не связанных с комфортом пассажиров: мотор-компрессорах, вентиляторах и преобразователях для их питания.

Существует четыре распространенные конфигурации тяговых систем. Трехфазные инверторы, использующие алгоритм ШИМ, представляют собой преобразователи с регулируемым переменным напряжением и частотой на выходе, которые преобразуют постоянный ток контактной сети или промежуточного звена в переменный. Для России в настоящее время характерна ситуация, когда используется двигатель постоянного тока и реостатный пуск с последующим прямым подключением

Таблица 2. Характеристики тяговых двигателей электропоездов различных типов

Тип тягового электродвигателя	Постоянного тока, УРТ 110 (РФ)	Асинхронный 1ТВ2216-0GB03 Электропоезд «Ласточка»	С возбуждением от постоянных магнитов, серия 1600 (Toshiba, Япония)	С возбуждением от постоянных магнитов TQ-600 (CSR, Китай)
Мощность часовая, кВт	200	320	205	600
Масса, кг	2150	836	560	635
Частота вращения, об/мин	1145	2200	н/д	4200
Геометрические размеры, мм	Высота – 800 Длина – 845 Ширина – 1004		Диаметр – 600 Ширина – 496	Высота – 697 Длина – 560 Ширина – 654
Тип охлаждения	Самовентиляция с осевым вентилятором	Самовентиляция с осевым вентилятором	Полностью закрытое исполнение	Принудительная вентиляция
Удельная мощность, кВт/кг	0,09	0,38	0,37	0,94
КПД	0,9	0,94	н/д	0,95

к контактной сети, что в мире уже почти не используется.

Одной из альтернатив асинхронным двигателям является синхронный двигатель на постоянных магнитах (PMSM), который может иметь высокую эффективность – до 97%. Электрические потери в нем снижены вследствие того, что постоянные магниты используются для создания магнитного потока вместо возбуждения от обмоток на роторе. Кроме того, двигатели PMSM имеют меньшие габариты, более высокую удельную мощность, они легче, не требуют интенсивного охлаждения, позволяют обеспечить рекуперативное торможение на низких скоростях, имеют герметичное исполнение, что снижает затраты на техническое обслуживание. Уменьшение массы снижает также и удельный расход энергии на тягу. Параметры сопоставлены в таблице 2 и представлены на рис. 3.

Они также позволяют использовать конфигурацию прямого привода, что ведет к снижению потерь массы, хотя это в настоящее время и не реализовано широко, имеются только опытные образцы, представленные, например, компанией Skoda. Стоимость двигателей PMSM высокая с учетом индивидуального управления, требующего наличия специальных инверторов и защиты. Несмотря на это, они считаются коммерчески перспективными и уже активно применяются на железнодорожном транспорте. Технология

PMSM в настоящее время используется на нескольких линиях японского метро, включая Токио, и междугородных маршрутах корпорации Hankyu, показывая экономию 10–20% и 12% соответственно. Двигатели PMSM также внедряются в высокоскоростном движении, с предполагаемой экономией 7% в Японии. В Китае сейчас тестируют оборудование PMSM с использованием этой технологии в пассажирском движении.

Относительно недорогим является техническое решение для снижения расхода электроэнергии на тягу посредством установки интеллектуального программного обеспечения для управления тяговым и вспомогательным оборудованием. Силовая электроника обычно управляется микропроцессорным контроллером, и изменения заданных значений различных параметров, таких как напряжение промежуточной шины постоянного тока или магнитного потока, могут дать экономию от 1% до 3%.

Другой подход заключается в применении микропроцессорного управления тяговым приводом в зависимости от условий эксплуатации. Экономия энергии до 5% можно реализовать за счет уменьшения мощности или отключения неиспользуемой секции. Аналогичная оптимизация программного обеспечения может быть использована для управления вспомогательным оборудованием, функционирующим только при необходимости.

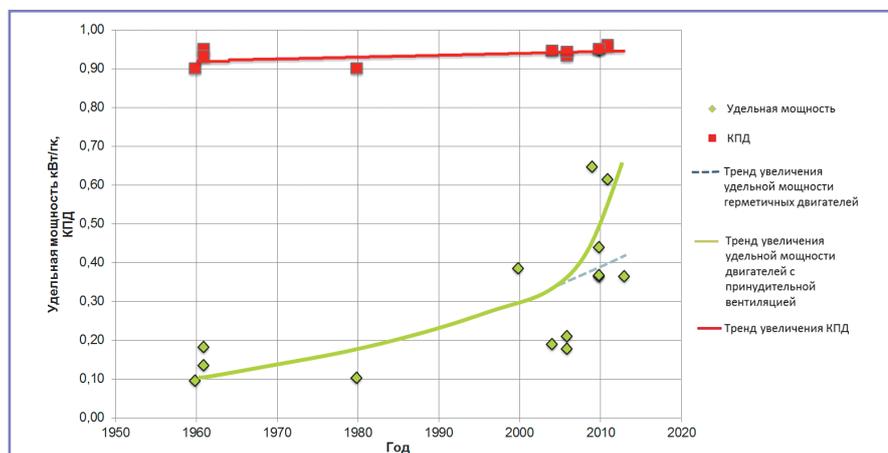


Рис. 3. График роста показателей тяговых электродвигателей

Уменьшение сопротивления движению

Преодоление сопротивления движению поезда требует от 10% до 30% потребляемой тяговой энергии. Это составляет значительную долю от общего энергопотребления, актуально как для пассажирских, так и для пригородных и высокоскоростных поездов, где более высокие скорости увеличивают общее сопротивление движению за счет аэродинамической составляющей.

Снижение массы поезда является одним из способов повышения энергоэффективности. В процентном отношении к массе данное снижение может достигать до 50%. Материалы с малой удельной массой и новые конструктивные методы решения должны быть выбраны на стадии проектирования, но в некоторых случаях это может быть целесообразно для модернизации имеющегося подвижного состава. В некоторых случаях можно заменить материал кузова, окон, тележек, внутренний интерьер сидений, кабины машиниста и пассажирских помещений.

Сопротивление движению может быть также уменьшено за счет уменьшения его аэродинамической составляющей. Наибольшая экономия возможна, когда метод аэродинамической оптимизации используется на этапе проектирования. Это особенно важно для высокоскоростного ЭПС, так как сопротивление увеличивается пропорционально квадрату скорости.

Более дешевая и простая альтернатива снижению аэродинамического сопротивления состоит в уменьшении максимальной эксплуатационной скорости. Дополнительные преимущества включают в себя снижение шумового воздействия и интервала времени между поездами. Имеются исследования, в которых показано, что потребление энергии может быть уменьшено до 5,7% путем ограничения максимальной скорости с 330 до 310 км/ч. Если же ограничить скорость на уровне 230 км/ч, экономия составит уже 27,9%. Тем не менее существует компромисс между сокращением энергии, увеличением времени пути и количеством поездов. Например, изменение ограничения скорости в метро Брюсселя снизило расход энергии на 12%, но потребовались дополнительные поезда для удовлетворения спроса.

Применение энергоэффективных режимов ведения поездов

Типичная кривая скорости электропоезда между станциями состоит из трех элементов: тяга с ускорением, движение в тяге с постоянной скоростью и торможение. В некоторых случаях может быть использован и режим выбега, хотя для современного ЭПС с асинхронным приводом это не так характерно, как для ЭПС с двигателями постоянного тока и реостатным пуском. Обширные исследования были проведены в оптимальном сочетании этих фаз для конкретных участков и ниток с целью уменьшения потребления энергии.

Достижимая экономия тоже зависит от компромисса между сокращением энергии и увеличением времени в пути, а также от характеристик поезда и пути. Тем не менее многие исследования показывают, что экономия в пределах 15% и 35% достижима только с увеличением времени в пути на 5–12%, которые могут быть включены в график. Один исключительный

пример прогнозирует экономию в 48% при увеличении на 17% времени в пути.

Рекуперативное торможение

Рекуперативное торможение (рекуперация) – повсеместно используемая технология, которая позволяет преобразовывать тормозную энергию поезда в электрическую благодаря способности электрических тяговых двигателей работать в генераторном режиме. При этом направление вращающего момента противоположно направлению вращения, что приводит к снижению скорости поезда. При соблюдении ряда условий в сеть может быть возвращено более 33% энергии, потребляемой на тягу. Рекуперативная энергия торможения может использоваться непосредственно самим поездом для питания системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и освещения, может через контактную сеть питать другие поезда на фидерном участке, а в системе переменного тока – возвращением через подстанции в энергосистему.

Использование гибридного привода

В последние годы инженеры все больше склоняются к использованию гибридного тягового электропривода с размещением накопителей энергии на ЭПС. Такой способ, помимо эффективного использования энергии рекуперации, позволяет уменьшить нагрузку на тяговую сеть в пусковом режиме, обеспечить автономное движение электрического подвижного состава без питания от контактной сети.

По оценкам специалистов и исходя из мирового опыта, снижение энергопотребления за счет эффективной рекуперации при использовании гибридного привода составляет на участках постоянного тока до 25%, на участках переменного тока до 6–7% [8–10]. В качестве примера можно привести опытный электропоезд Electrostar Bombardier (рис. 4).

Его основные технические характеристики приведены в таблице 3.

Литература

1. Зайцев А.А., Евстафьев А.М., Пегов Д.В., Крылов А.В. Применение интеллектуальных технологий для повышения энергоэффективности электроподвижного состава постоянного тока // Электротехника, 2017, № 10.– С. 56–61.
2. Титова Т.С., Евстафьев А.М. Энергоэффективные системы вспомогательного электропривода электрического подвижного состава // Транспорт Российской Федерации, 2017, № 5 (72).– С. 60–63.
3. Евстафьев А.М. Энергосберегающие технологии на тяговом подвижном составе: монография / Евстафьев А.М., Титова Т.С.– Санкт-Петербург: ПГУПС, 2018.– 165 с.
4. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1 // Транспорт Российской Федерации, 2018, № 6 (79).– С. 40–44.
5. Hoffrichter A. Hydrogen as an energy carrier for railway traction. University of Birmingham, 2013.
6. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Евстафьева М.В. Оценки энергоэффективности железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2017, т. 14, № 1.– С. 119–126.
7. Андрущенко, А.А. Асинхронный тяговый привод локомотивов: учебное пособие / А. А. Андрущенко, Ю. В. Бабков, А. А. Зарифьян и др.; под ред. А. А. Зарифьяна.– М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013.– 413 с.
8. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В. Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава // Электротехника, 2018, № 10.– С. 21–25.
9. Евстафьев А.М., Никитин В.В. Накопители энергии как средство повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава // Электроника и электрооборудование транспорта, 2018, № 5.– С. 26–29.

10. Евстафьев А.М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований, 2018, № 3.– С. 27–38.

Евстафьева Марина Валерьевна

Родилась в 1988 году. В 2011 году окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 10 научных трудов.

Изварин Михаил Юльевич

Родился в 1964 году. В 1987 году окончил ЛИИЖТ по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 1998 году защитил диссертацию по теме «Преобразователь для питания бортовых цепей электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 45 научных трудов.

Васильев Виталий Алексеевич

Родился в 1983 году. В 2007 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения. Кандидат технических наук. В 2012 году защитил диссертацию по теме «Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Автор 16 научных публикаций

Evstafeva Marina

Was born in 1988. In 2011 she graduated from St. Petersburg State University of Railway Engineering with a degree in “Organization of transportation and management of railway transport”. Work experience is 13 years. At present she is an assistant at the Electric traction department of PGUPS. She has more than 10 scientific papers.

Izvarin Mikhail

Was born in 1964. In 1987 he graduated from Leningrad State Transport University majoring in “Electrification of railway”. He is candidate of technical sciences, associated professor. In 1998 he defended the dissertation with topic “Conversion device for power supply of on-board circuits of electric trains of direct current”. He has 29 years of work experience. At present he works as associate professor at the Electric traction department of PGUPS. He has 45 scientific papers.

Vasiliev Vitaliy

Was born in 1983. In 2007 he graduated from St. Petersburg State University of Railway Engineering. Candidate of technical sciences. In 2012 he defended his thesis on the topic “Improving the energy efficiency of direct current electric trains”. Work experience is 15 years. At present he is an assistant professor at the Electric traction department of PGUPS. Has 16 scientific papers.



Рис. 4. Моторвагонный контактно-аккумуляторный электропоезд Electrostar, работающий на британских железных дорогах

Таблица 3. Основные технические характеристики опытного контактно-аккумуляторного электропоезда Electrostar 379

Тип подвижного состава	Страна	Ширина колеи, мм	Составность	Осевая формула	Тип тяги	Тип мех. части	Нагрузка на ось, тс	Мощность, кВт	Ускорение, м/с ²	Тяговый привод
Односистемный контактно-аккумуляторный электропоезд Electrostar 379	Великобритания	1435	Три частично обмоторенных и один прицепной вагон	2'+B0'+2'+2'-B0'+2'+B0'+2' (4 вагона)	Распределенная	Несочлененные моторные тележки	16	25 кВт, 50 Гц 1200 Батарея литий-ионная 1200	0,72	Асинхронный

Исследование влияния накопителя электрической энергии на показатели движения и неравномерности энергопотребления электрического подвижного состава

// Research of the influence of electric energy storage on motion indicators and inequality of energy consumption electric mobile composition //

Шарьяков В. А., к. т. н., доцент,
АО «НПП «ЭПРО», Санкт-Петербург
Шарьякова О. Л., к. т. н., доцент,
СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Киселев И. Г., д. т. н., профессор,
Иванов И. А., д. т. н., профессор,
Макарова Е. И., д. т. н., доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Широкое использование современных тяговых электроприводов позволяет получить необходимые динамические характеристики электрического подвижного состава и повысить энергоэффективность. В статье рассматривается возможность повышения энергоэффективности и снижения неравномерности энергопотребления тягового привода за счет накопления энергии рекуперативного торможения и дальнейшего ее использования. В работе предлагается использовать конденсаторы большой емкости (суперконденсаторы) в качестве накопителей электрической энергии. Для определения основных энергетических параметров и показателей неравномерности энергопотребления использовалась математическая модель. Основным преимуществом примененной модели является использование реальных данных, полученных во время движения существующего подвижного состава городского электротранспорта, не оснащенного накопителями энергии, и записанных в текстовом формате: потребляемый ток из контактной сети, напряжение тяговой сети, скорость, ток через тормозной резистор. Результаты исследований доказывают возможность снижения энергопотребления и спрямления неравномерности энергопотребления при движении подвижного состава.

Ключевые слова: электрический подвижной состав, городской электротранспорт, тяговый электропривод, рекуперативное торможение, накопитель энергии, суперконденсатор, математическое моделирование, неравномерность энергопотребления.

Ежегодно увеличивается количество современного электрического подвижного состава (ЭПС), использующего рекуперативное торможение в широком диапазоне скоростей.

Если ЭПС, оснащенный резисторно-контакторной системой управления, обладал только существенно неравномерным графиком энергопотребления, то современный ЭПС в режиме рекуперативного торможения становится источником электрической энергии, снижая нагрузку на фидере, питающем участок сети, а в ряде случаев и полностью его отключая. После окончания

Extensive use of modern traction drives allows to obtain the necessary dynamic characteristics of electric rolling stock and improve energy efficiency. The article discusses the possibility of improving energy efficiency and reducing the uneven energy consumption of the traction drive by accumulating energy of regenerative braking and its further use. It is proposed to use capacitors of high capacity (supercapacitors) as electric energy storage devices. A mathematical model was used to determine the main energy parameters and indicators of uneven energy consumption. The main advantage of the applied model is the use of real data obtained during the movement of the existing rolling stock of urban electric transport, not equipped with energy storage, and recorded in text format: the current consumed from the contact network, the voltage of the traction network, speed, current through the brake resistor. The research results prove the possibility of reducing energy consumption and straightening the uneven energy consumption when moving rolling stock.

Keyword: electric rolling stock, urban electric transport, traction electric drive, regenerative braking, energy storage, supercapacitor, mathematical modeling, uneven energy consumption.

рекуперативного торможения нагрузка на фидере почти мгновенно восстанавливается. Такое переключение нагрузки на фидере оказывает вредное влияние на оборудование тяговых подстанций и инфраструктуры сети. Кроме того, основная масса тяговых подстанций, особенно городского электрического транспорта (ГЭТ), не в состоянии возвращать энергию рекуперации в питающие сети, что приводит к возникновению перенапряжений в тяговой сети.

Одним из способов снижения влияния рекуперативного торможения на тяговую

сеть может быть использование накопителей электрической энергии (НЭЭ) [1].

Условием выбора НЭЭ является возможность накопления в себе электрической энергии рекуперации при единичном торможении с учетом следующих требований к динамическим характеристикам ЭПС ГЭТ:

- максимальная скорость – 75 км/ч;
- максимальная величина замедления – 1,2 м/с².

Время торможения составит 17 с.

Для определения необходимой емкости НЭЭ воспользуемся средним значением энергии ($E_{\text{НЭЭ ср}}$), определяемой на участке времени между началом торможения и полной остановкой ЭПС

$$E_{\text{НЭЭ ср}} = \frac{m_{\text{ЭПС}}}{t_{\text{к}} \cdot 2 \cdot 3 \cdot 6^2} \cdot \int_0^{t_{\text{к}}} V^2(t) dt = \frac{m_{\text{ЭПС}}}{2 \cdot 3 \cdot 6^2} \cdot \frac{V_{\text{от}}^2}{3}, \quad (1)$$

где $m_{\text{ЭПС}}$ – масса ЭПС, кг; $V(t)$ – текущая скорость ЭПС, км/ч; $V_{\text{от}}$ – скорость начала торможения, км/ч.

Для решения задачи использования энергии рекуперации рациональнее применять НЭЭ на суперконденсаторах [1]. Они позволяют накапливать достаточное количество энергии, при этом номинальные токи их заряда/разряда значительно превышают рабочие токи ЭПС. На сегодняшний день на рынке представлено достаточно большое количество производителей суперконденсаторов, упакованных в ячейки с напряжением 2–3 В и емкостью до 3000–4000 Ф или упакованных в сборки-блоки на напряжения 12–300 В и емкостью 50–200 Ф со встроенной системой управления для эффективной балансировки и CAN-шиной.

Емкость суперконденсатора может быть определена следующим образом:

$$C_{\text{НЭЭ}} = \frac{2 \cdot E_{\text{НЭЭ ср}}}{U_{\text{max}}^2 - U_{\text{min}}^2}, \quad (2)$$

где $C_{\text{НЭЭ}}$ – емкость суперконденсатора, Ф; U_{max} – максимальное напряжение в звене постоянного тока тягового преобразователя, В; U_{min} – минимальное напряжение в звене постоянного тока тягового преобразователя, В.

Требуемые емкость и напряжение можно обеспечить, например, звяв конденсаторные блоки на 170 В и 53 Ф (пр-во Skeleton Technologies GmbH или ТЭЭМП), соединив их в модуле по пять штук последовательно, и каждый модуль подключить к тяговому преобразователю.

С помощью компьютерного моделирования рассмотрим возможность снижения неравномерности энергопотребления ЭПС.

Учитывая, что современный ЭПС согласно техническим заданиям должен комплектоваться устройством, предоставляющим текущую информацию о параметрах движения водителю и обеспечивающим ее хранение в архиве в течение 5–7 дней, можно в качестве исходных данных использовать суточные параметры движения трамваев и троллейбусов, которые еще не оснащены НЭЭ.

В качестве исходных данных использовалась информация, полученная из архивов троллейбусов модели Тролза-5265.00 и ВМЗ-5298, трамваев моделей БКМ 84300М, 71-631-02.02, ЛМ-68М2, эксплуатируемых в Санкт-Петербурге.

При моделировании использованы следующие параметры движения ЭПС, записанные за один день работы на линии: $U_{кс}$ – напряжение контактной сети, В; $I_{кс}$ – ток, потребляемый из контактной сети ЭПС, А; $I_{рт}$ – общий ток, протекающий через тормозные резисторы ЭПС, А; V – скорость движения, км/ч.

Основные характеристики движения, рассчитанные по данным, хранящимся в таких архивах, приведены в таблице 1.

Моделирование производилось для двух вариантов включения НЭЭ:

- НЭЭ подключается параллельно к емкостному фильтру тягового преобразователя;
- НЭЭ подключается к емкостному фильтру тягового преобразователя через преобразователь разряда/заряда.

Использование преобразователя разряда/заряда обеспечивает возможность разряда НЭЭ ниже напряжения в тяговой сети и в случаях низкого энергопотребления ЭПС подзаряжать НЭЭ до 80–90%, оставляя запас на прием энергии рекуперации.

Моделирование первого варианта показало (таблица 2), что такое включение НЭЭ позволяет снизить среднюю мощность, удельное энергопотребление и энергопотребление ЭПС ориентировочно на 30–35%.

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t) \cdot dt, \quad (3)$$

где P_{cp} – средняя за время расчетного периода мощность потребления ЭПС, кВт; $P(t)$ – текущее значение мощности, потребляемой ЭПС во время движения, кВт; T – время в нахождении в движении ЭПС, с.

$$E_{cp} = P_{cp} \cdot T, \quad (4)$$

где E_{cp} – среднее энергопотребление ЭПС, кВт·ч.

$$P_{уд} = \frac{P_{cp}}{V_{cp}}, \quad (5)$$

где $P_{уд}$ – удельное энергопотребление, кВт·ч/км; V_{cp} – средняя за время расчетного периода скорость ЭПС, км/ч.

Результаты моделирования второго варианта приведены в таблице 3.

Включение НЭЭ через преобразователь разряда/заряда дополнительно к снижению средней мощности и энергопотребления обеспечило снижение максимального тока, максимальной мощности.

Неравномерность графика энергопотребления можно охарактеризовать следующими показателями [2, 3]:

- интегральный коэффициент максимума, или пик-фактор

$$\Pi = \frac{P_{MAX}}{P_{cp}} \quad (6)$$

где P_{MAX} – максимальная за время расчетного периода мощность потребления ЭПС, кВт.

Пик-фактор является наиболее простым и широко распространенным показателем неравномерности, который характеризует отношение P_{MAX} к P_{cp} :

- коэффициент заполнения, или плотность нагрузки, который характеризует долю средней за время движения электроэнергии по отношению к максимальной

$$\gamma = \frac{\int_0^T P(t) \cdot dt}{T \cdot P_{MAX}}; \quad (7)$$

- время использования среднемаксимальной (наибольшей) нагрузки

$$Tm = \frac{\int_0^T P(t) \cdot dt}{P_{MAX}} = T \cdot \gamma. \quad (8)$$

Рассчитанные интегральные показатели неравномерности энергопотребления по основным характеристикам движения для исходных данных из архива приведены в таблице 4.

Рассчитанные интегральные показатели неравномерности энергопотребления по результатам моделирования для обоих вариантов приведены в таблицах 5, 6.

Учитывая, что включение НЭЭ непосредственно параллельно к емкостному фильтру тягового преобразователя привело к снижению средней мощности, а максимальная мощность практически не изменилась, следовательно, интегральные показатели неравномерности энергопотребления ЭПС для первого варианта ухудшились.

Снижение максимальной мощности и средней мощности, полученное при моделировании второго варианта, когда НЭЭ подключается к емкостному фильтру тягового преобразователя через преобразователь разряда/заряда, привело к улучшению интегральных показателей неравномерности энергопотребления ЭПС.

В таблицах 7 и 8 показаны ориентировочные изменения показателей, рассчитанных при моделировании обоих вариантов по отношению к исходным данным.

Проведенное моделирование и расчеты основных характеристик движения ЭПС и показателей неравномерности энергопотребления

Таблица 1. Основные характеристики движения ЭПС без использования НЭЭ

ЭПС	I_{MAX} , А	P_{MAX} , кВт	V_{MAX} , км/ч	V_{cp} , км/ч	P_{cp} , кВт	$P_{уд}$, кВт·ч/км	E_{cp} , кВт·ч	T , час
Тролза-5265.00	379	208	57	17,5	25	1,43	178	7,1
ВМЗ-5298	421	238	67	23,4	29	1,24	331	11,3
БКМ 84300М	1106	634	68	16,2	41	2,53	385	9,3
71-631-02.02	870	531	54	16,4	23	1,40	255	11,9
ЛМ-68М2	475	276	48	16,7	20	1,20	188	9,3

Таблица 2. Основные характеристики движения ЭПС при использовании НЭЭ

ЭПС	I_{MAX} , А	P_{MAX} , кВт	V_{MAX} , км/ч	V_{cp} , км/ч	P_{cp} , кВт	$P_{уд}$, кВт·ч/км	E_{cp} , кВт·ч	T , час
Тролза-5265.00	379	208	57	17,5	12	0,68	85	7,1
ВМЗ-5298	421	238	67	23,4	20	0,85	228	11,3
БКМ 84300М	1106	634	68	16,2	27	1,66	254	9,3
71-631-02.02	870	531	54	16,4	17	1,03	189	11,9
ЛМ-68М2	428	247	48	16,7	9	0,54	85	9,3

Таблица 3. Основные характеристики движения ЭПС при использовании НЭЭ и преобразователя разряда/заряда

ЭПС	I_{MAX} , А	P_{MAX} , кВт	V_{MAX} , км/ч	V_{cp} , км/ч	P_{cp} , кВт	$P_{уд}$, кВт·ч/км	E_{cp} , кВт·ч	T , час
Тролза-5265.00	274	163	57	17,5	10	0,56	71	7,1
ВМЗ-5298	354	200	67	23,4	22	0,93	251	11,3
БКМ 84300М	318	191	68	16,2	18	1,12	173	9,3
71-631-02.02	333	202	54	16,4	16	0,96	178	11,9
ЛМ-68М2	105	71	48	16,7	7	0,41	66	9,3

Таблица 4. Интегральные показатели неравномерности энергопотребления ЭПС без использования НЭЭ

ЭПС	Π	γ	Tm , час	T , час
Тролза-5265.00	8,2	0,12	0,87	7,1
ВМЗ-5298	8,1	0,12	1,39	11,3
БКМ 84300М	15,6	0,06	0,6	9,3
71-631-02.02	22,4	0,04	0,53	11,9
ЛМ-68М2	14,0	0,07	0,67	9,3

Таблица 5. Интегральные показатели неравномерности энергопотребления ЭПС при использовании НЭЭ

ЭПС	П	γ	T_m , час	T , час
Тролза-5265.00	17,5	0,06	0,4	7,1
ВМЗ-5298	12,3	0,08	0,91	11,3
БКМ 84300М	24	0,04	0,4	9,3
71-631-02.02	30,5	0,03	0,39	11,9
ЛМ-68М2	28,5	0,04	0,32	9,3

Таблица 6. Интегральные показатели неравномерности энергопотребления ЭПС при использовании НЭЭ и преобразователя разряда/заряда

ЭПС	П	γ	T_m , час	T , час
Тролза-5265.00	16.3	0.06	0.44	7,1
ВМЗ-5298	9	0.11	1.25	11,3
БКМ 84300М	18	0.06	0.52	9,3
71-631-02.02	12.4	0.08	0.96	11,9
ЛМ-68М2	10	0.1	0.92	9,3

Таблица 7. Изменение основных характеристик движения ЭПС, рассчитанных при моделировании обоих вариантов

Вариант	I_{MAX} , %	P_{MAX} , %	P_{cp} , %	$P_{уд}$, %	E_{cp} , %
1	3	2	37	37	37
2	49	48	37	37	37

Таблица 8. Изменение интегральных показателей неравномерности энергопотребления ЭПС, рассчитанных при моделировании обоих вариантов

Вариант	П, %	γ , %	T_m , %
1	-64	36	38
2	12	-12	-10

ЭПС показало, что применение НЭЭ, выбранного по условию обеспечения утилизации энергии рекуперации, полученной при единичном торможении без использования преобразователя разряда/заряда, позволяет уменьшить энергопотребление ЭПС ориентировочно на 30–40% по сравнению с исходным вариантом. Однако в этом случае не происходит снижения максимальных потребляемых тока и мощности, что приводит к еще большей неравномерности энергопотребления. Подключение НЭЭ через преобразователь разряда/заряда позволило также уменьшить энергопотребление ЭПС и незначительно выровнять неравномерность энергопотребления по отношению к первому варианту. Таким образом, подключение НЭЭ через преобразователь разряда/заряда позволяет не только уменьшить энергопотребление из тяговой сети, но и снизить его неравномерность.

Литература

1. Шарьяков В.А., Шарьякова О.Л., Агунов А.В., Третьяков А.В. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава // Электротехника, 2018, № 10. – С. 55–59.
2. Павельчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии [Текст] / М. Павельчик // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МИИТ, 2000. – 451 с.
3. Шевлюгин М.В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и в метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии [Текст] / М.В. Шевлюгин // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МИИТ, 2013. – 345 с.

Шарьяков Владимир Анатольевич

Родился в 1976 году. В 2000 году окончил Санкт-Петербургский институт машиностроения «ЛМЗ-ВТУЗ» по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Кандидат технических наук, доцент. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Интегрирование частотно-управляемых асинхронных электроприводов в автоматизированные системы машинных агрегатов». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает исполнительным директором АО «НПП «ЭПРО». Имеет 35 научных публикаций.

Шарьякова Ольга Леонидовна

Родилась в 1969 году. В 1993 году окончила Санкт-Петербургский институт машиностроения «ЛМЗ-ВТУЗ» по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Кандидат технических наук, доцент. В 1998 году защитила диссертацию по теме «Синтез алгоритмов управления электромеханическими системами вибрационных установок». Опыт работы – 26 лет. В настоящее время работает доцентом в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете.

Киселев Игорь Георгиевич

В 1963 году закончил механический факультет Ленинградский институт инженеров транспорта. Доктор технических наук, профессор. В 1978 году защитил диссертацию по теме «Исследование теплообмена при преобразовании энергии в силовых установках локомотивов». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электротехника и теплотехника» ПГУПС.

Иванов Игорь Александрович

В 1960 году окончил Ленинградский кораблестроительный институт по специальности

«Машиностроение». Доктор технических наук, профессор. В 1992 году защитил диссертацию по теме «Повышение ресурса колес рельсовых экипажей». Опыт работы – 59 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Технология металлов» ПГУПС. Имеет 356 научных трудов.

Макарова Елена Игоревна

Родилась в 1975 году. В 1997 году окончила ПГУПС по специальности «Водоснабжение, водоотведение, рациональное использование и защита водных объектов». Доктор технических наук, доцент. В 2012 году защитила диссертацию по теме «Научные основы защиты окружающей среды при ликвидации, обезвреживании и блокировании загрязнений железнодорожного транспорта». Опыт работы – 28 лет. В настоящее время работает деканом факультета безотрывных форм обучения ПГУПС. Имеет более 200 научных работ, в том числе 40 патентов.

Sharyakov Vladimir

Was born in 1976. In 2000 he graduated from the St. Petersburg Institute of Mechanical Engineering "LMZ-VTUZ" with a degree in "Automation of technological processes and production". Candidate of technical sciences, associate professor. In 2004 he defended his thesis on the topic "Integration of frequency-controlled asynchronous electric drives into automated systems of machine units". Work experience is 20 years. At present he is an executive director of "NPP EPRO" JSC. He has 35 scientific publications.

Sharyakova Olga

Was born in 1969. In 1993 she graduated from the St. Petersburg Institute of Mechanical Engineering "LMZ-VTUZ" with a degree in "Automation of technological processes and production". Candidate of technical sciences, associate professor. In 1998 she defended her thesis on the topic "Synthesis of control algorithms for electromechanical systems of vibration machines". Work experience is 26 years. At present she is an assistant professor at the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

Kiselev Igor

In 1963 he graduated from the Department of Mechanics of Leningrad Institute of Railway Engineers. Doctor of engineering sciences, professor. In 1978 he defended his thesis on the topic "Research on heat exchange under transformation of energy in power equipment of locomotives". Work experience is more than 50 years. Currently he works as head of the Electrical engineering and heat-power engineering department at PGUPS.

Ivanov Igor

In 1960 he graduated from State Marine Technical University with a degree in "Engineering technology". Doctor of engineering sciences, professor. In 1992 he defended his thesis on the topic "Improvement of operating life of rail-tracked coaches tyres". Work experience is 59 years. At present he works as a professor at the Department of metal technology of PGUPS. He has 356 scientific papers.

Makarova Elena

Was born in 1975. In 1997 she graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in "Water supply, water disposal, sustainable utilization and protection of water bodies". Doctor of engineering science, associate professor. In 2012 she defended the dissertation with topic "Scientific basis of environmental protection under decommissioning, detoxification and blockage of pollution from rail transport". He has 28 years of work experience. At present she works as the head of Department of continuous study mode of PGUPS. She has more than 200 scientific works, including 40 patents.

Проблема электрокоррозии подшипников электропоездов «Сапсан»

// The problem of electro corrosion of bearings on high-speed Sapsan trains //

Лысов Н. В., к. т. н.,
Брагин А. Г., к. т. н., Володин А. А., к. т. н., доцент,
Иващенко В. О., к. т. н., доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

В статье рассматривается одна из возможных гипотез повреждения подшипников (буксовых и тягового привода) при прохождении через них электрического тока. В результате проведенной опытной поездки электропоезда «Сапсан» выявлено 39 потенциально опасных мест, где возможно протекание уравнивающего тока вследствие наличия разности потенциалов на изолирующих стыках. Для ограничения подшипниковых токов тягового привода в тяговых двигателях проходит опытную эксплуатацию «гибридные» подшипники. **Ключевые слова:** измерения, токи заземляющих устройств, ток подшипника, буксовые подшипники, подшипники тяговых электродвигателей.

Концепция заземления электропоезда «Сапсан» предусматривает отвод тока в рельсы посредством заземляющих устройств (ЗУ), расположенных на дроссельных (для односистемных электропоездов В1) и трансформаторных (для двухсистемных электропоездов В2) вагонах. На моторных вагонах заземляющие устройства не предусмотрены: колесные пары моторных вагонов электрически изолированы от корпуса тележек. Такая изоляция обеспечивается резиновыми элементами в первичной ступени рессорного

The article reviews one of the possible ideas of bearings' damage (axle box and traction drive) during current flow. The pilot trip of high speed Sapsan train resulted in detection of 39 potentially dangerous sites with the risk of adjusting current flow due to potentials difference on insulated joints. To provide bearing currents' limitation of the traction drive, the preliminary operation of hybrid bearings of the driving motors is being conducted. **Keywords:** measurements, grounding devices currents, bearing current, axle bearings, traction motor bearings.

подвешивания. Принципиальная схема изоляции моторной колесной пары приведена на рис. 1.

Кроме резиновых элементов рессорного подвешивания изоляция моторной колесной пары предусматривает токоизолированные подшипники вала тягового электродвигателя. Корпус тягового электродвигателя крепится к промежуточной раме, которая электрически соединена с рамой тележки. Вал ротора через муфту соединен с редуктором, который также изолирован от рамы тележки.

При проведении технического обслуживания буксовых подшипников неоднократно были выявлены следы прохождения электрического тока по элементам подшипника. Анализ вышедших из строя тяговых электродвигателей и редукторов также показал, что на элементах тяговой передачи присутствуют следы оплавления, обусловленные прохождением электрического тока.

В качестве одной из гипотез, объясняющей данные повреждения, было выдвинуто предположение о том, что причиной протекания тока через подшипники является напряжение, прикладываемое к буксовым подшипникам колесных пар, возникающее при прохождении электропоездом изолирующих стыков. Для проверки этой гипотезы при проведении обкаточных испытаний электропоезда ЭВС10 были проведены замеры распределения токов по заземляющим устройствам и измерение напряжений между первой колесной парой и корпусом первой тележки головного вагона.

Для проверки распределения токов по заземляющим устройствам при проведении обкаточных испытаний вагон 001010 был дополнительно оборудован измерительным комплексом, который включал в себя четыре токовых измерителя для записи токов кабелей заземляющих устройств дроссельного вагона 001910, а также измеритель напряжения между корпусом тележки головного вагона и первой колесной парой головного вагона. Для измерения напряжения первая колесная пара была дополнительно оборудована заземляющим устройством, а кабель от заземляющего устройства был выведен на изолятор, закрепленный на раме тележки. Схема установки токовых измерителей представлена на рис. 2.

Кроме сигналов напряжения первой колесной пары и токов заземляющих устройств измерялись и осциллографировались величины напряжения контактной сети и потребляемого тяговой секцией электропоезда тока.

Обкаточная поездка была организована на участке Санкт-Петербург – Москва – Санкт-Петербург и проходила в графике движения скоростного поезда. Осциллограммы сигналов при отправлении электропоезда с Московского вокзала Санкт-Петербурга приведены на рис. 3.

На верхнем графике изображены значения скорости, путевой координаты, значений GPS-координат, зарегистрированные штатным регистратором электропоезда – системой «Автопилот». Частота записи данных сигналов – 1 Гц. На втором графике сверху приведены мгновенные (частота дискретизации – 100 мкс) значения токов заземляющих устройств второй и третьей колесных пар вагона 001910. На среднем графике токи левой и правой стороны соответствующих колесных пар просуммированы (синий график – ток второй колесной пары, зеленый – ток третьей колесной пары)

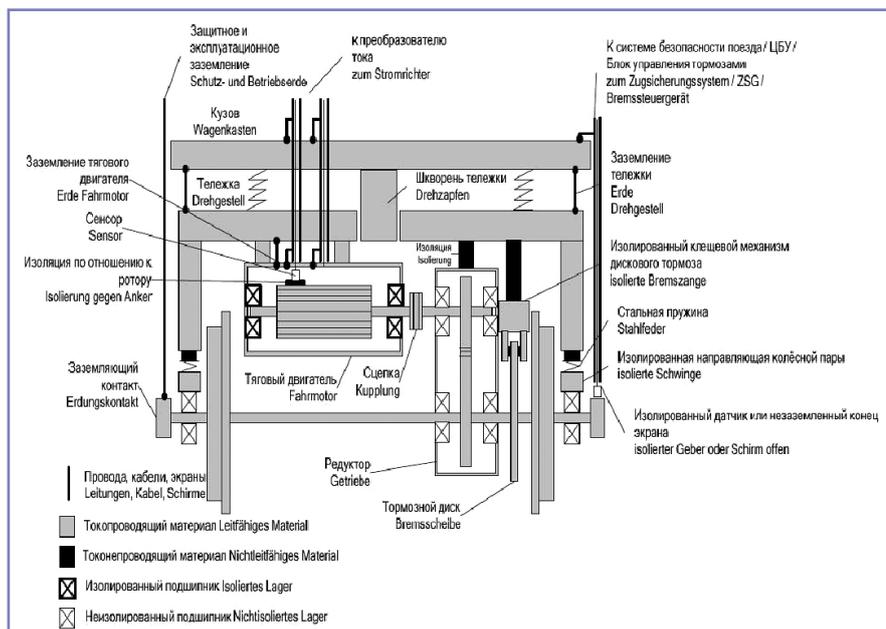


Рис. 1. Принципиальная схема изоляции моторной колесной пары

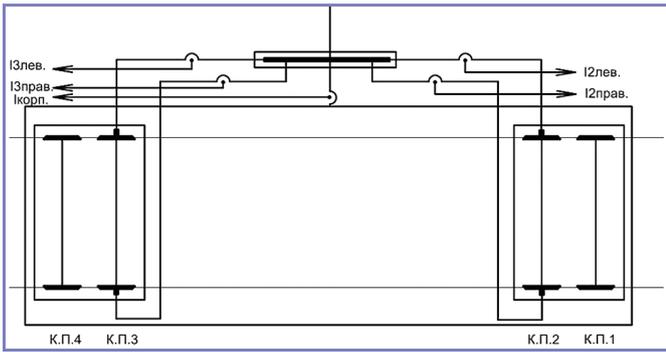


Рис. 2. Схема установки токовых клещей в цепи заземляющих устройств вагона 001910

и определен модуль разностного тока (красный цвет графика). На нижнем графике – токи заземляющих устройств, просуммированные по сторонам заземляющих устройств (зеленый – правая сторона, синий – левая).

На третьем графике изображен укрупненный участок второго графика, выделенный красным цветом.

На рис. 4 приведены осциллограммы регистрируемых величин при разгоне электропоезда до скорости 220 км/ч; на рис. 5 – соответствующие осциллограммы для режима электродинамического торможения со скорости 220 км/ч.

В режиме разгона и электрического торможения токовые нагрузки второй и третьей колесных пар изменяются прямо пропорционально сопротивлениям переходного контакта ЗУ. В отдельных случаях (например, рис. 4) возникает переходный процесс перераспределения токов заземляющих устройств, причем ток второй колесной пары всегда больше тока третьей колесной пары. Расстояние, которое преодолевается поездом (разность нарастанием и спаданием тока), составляет в среднем 15 метров, что говорит о том, что переходный процесс возникает при нахождении изолированного стыка между второй и третьей колесными парами. При наличии разности потенциалов между изолированными участками возникает уравнивающий ток, который замыкается через вторую колесную пару, сборную шину ЗУ и третью колесную пару.

Цель протекания уравнивающего тока при проследовании изолирующего стыка представлена на рис. 6.

На осциллограмме (точки 17, 18 и 19 на рис. 4) ток второй колесной пары увеличивается на ту же величину, на которую уменьшается ток третьей колесной пары. Это объясняется тем, что при наличии разности потенциалов на изолирующем стыке при его проследовании колесной

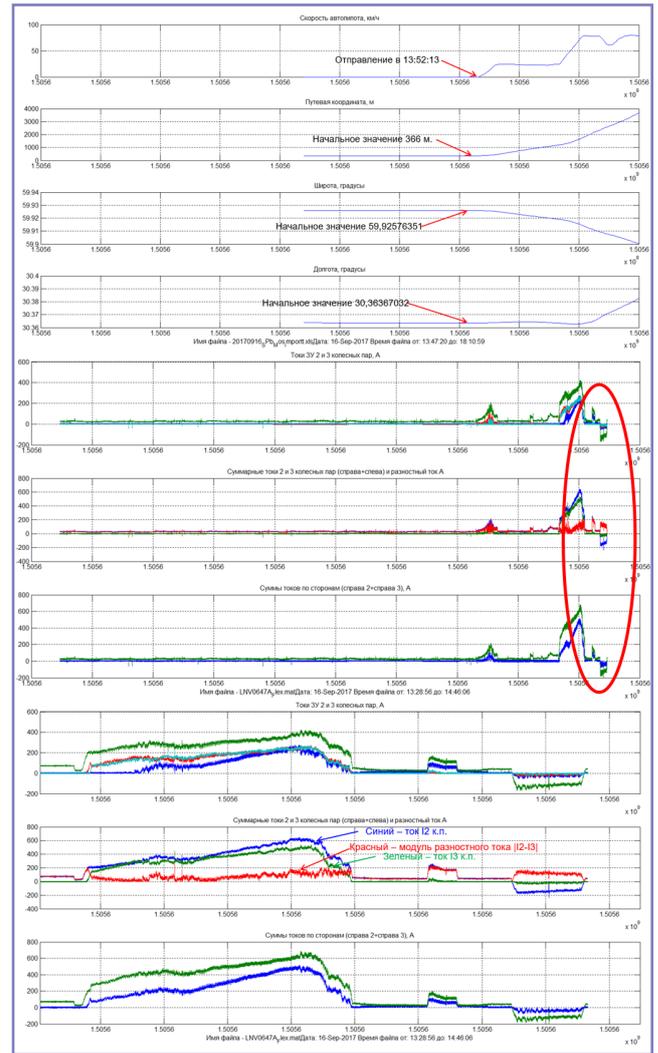


Рис. 3. Осциллограммы регистрируемых сигналов

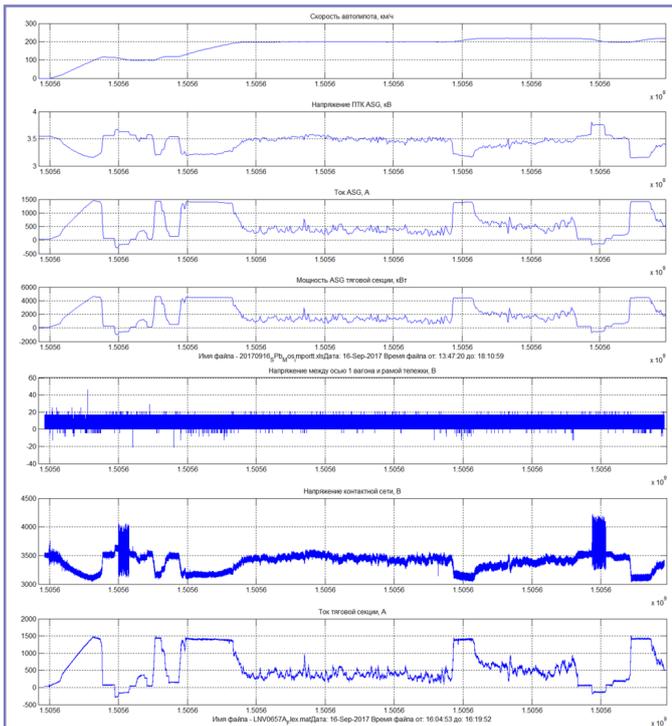
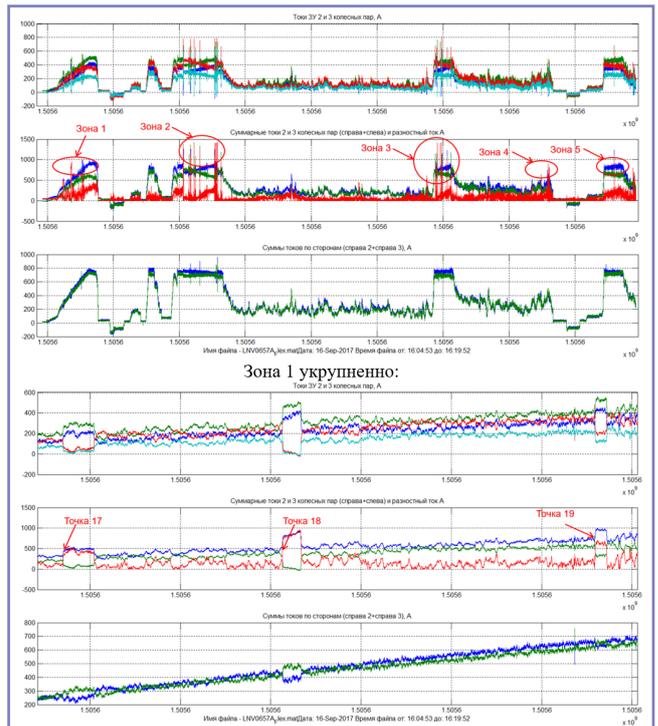


Рис. 4. Осциллограммы при разгоне до скорости 220 км/ч



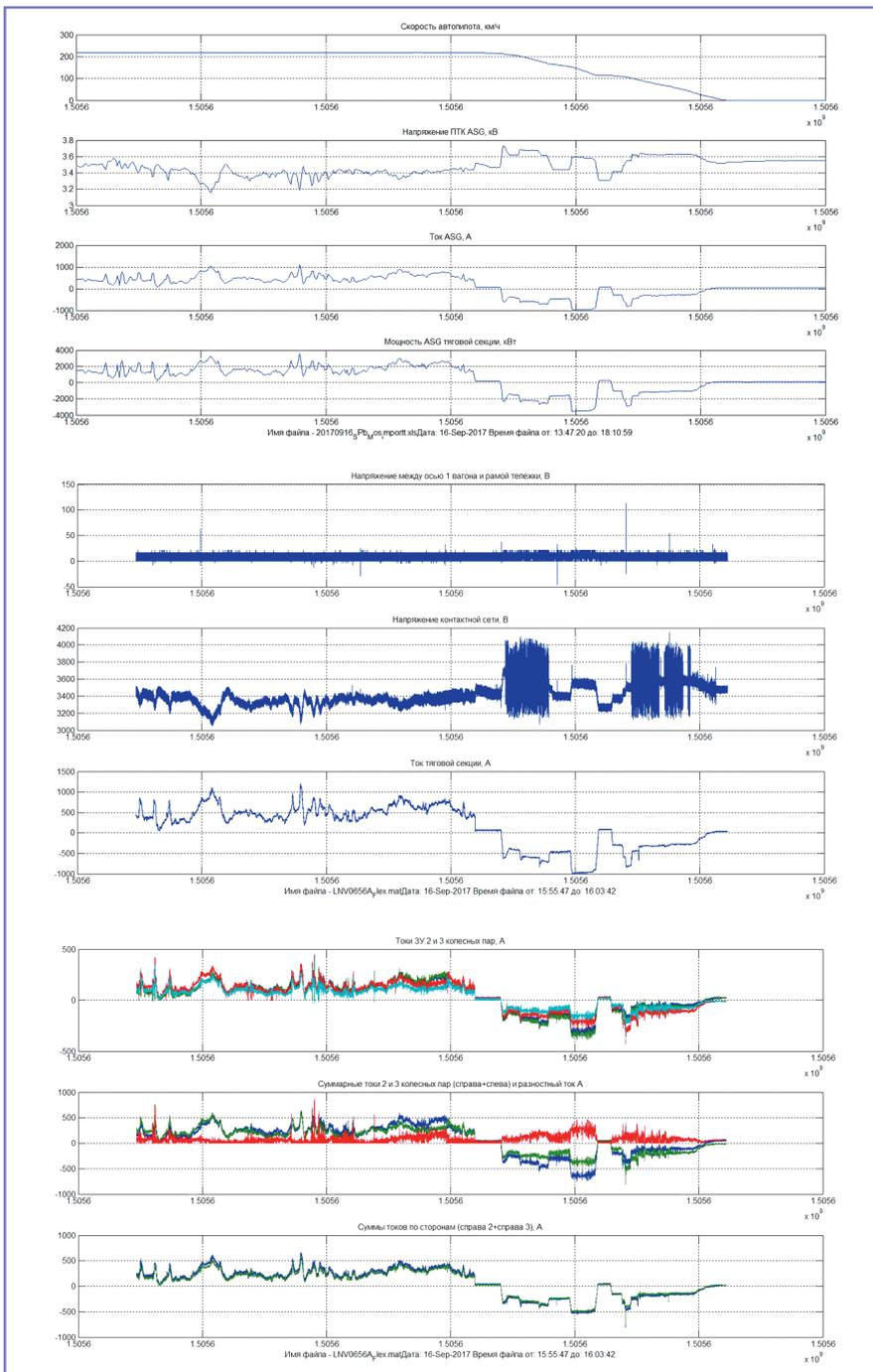


Рис. 5. Осциллограммы при электродинамическом торможении со скорости 220 км/ч

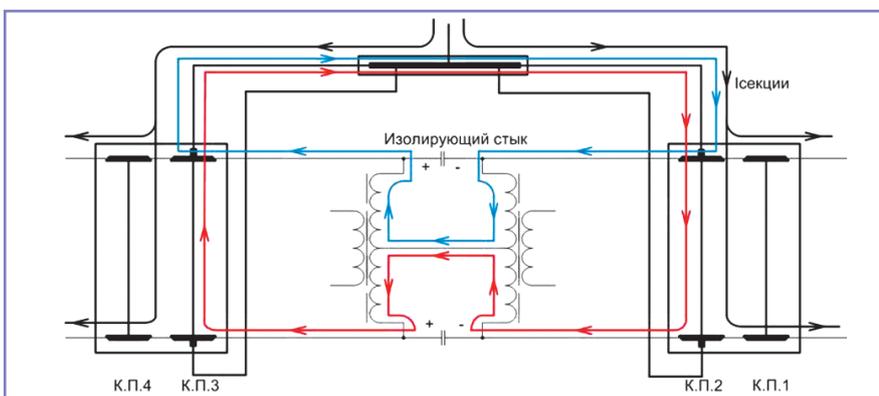


Рис. 6. Протекание уравнивающего тока

парой начинает протекать уравнивающий ток, который складывается с током 3У второй колесной пары (Iсекции/2) и вычитается (направлено встречно) из тока третьей колесной пары. При проследовании изолирующего стыка третьей колесной парой ток коммутируется на соседний участок, и протекание уравнивающего тока прекращается. Такая разность потенциалов может возникнуть на любом изолирующем стыке при протекании значительного тока от других находящихся на участке поездов и обусловлена падением напряжения на обмотках путевого дроссель-трансформатора. Вызванный этим падением напряжения ток, повреждающий подшипники, возникает вследствие перенапряжения, вызванного индуктивностью обмоток дроссель-трансформатора. При проведении обкаточных испытаний таких зон протекания уравнивающих токов было выявлено 39, точки были нанесены на карту, приведенную на рис. 7.

Сам по себе процесс протекания уравнивающих токов по штатным заземляющим устройствам не может рассматриваться как аварийный, требующий немедленного реагирования, однако изменение этого тока за промежуток времени до 10 мс вызывает появление импульса напряжения, который вызывает протекание уравнивающего тока через буксовые подшипники, повреждая их. Гипотезу прохождения электрического тока через подшипники также подтверждают проведенные в 2013 и 2018 годах сравнительные измерения нагрузок на подшипники привода. При этих испытаниях дополнительными датчиками оборудовалась моторная тележка вагона 001113, контролировались значения ускорений на элементах тягового привода, однако тяговый двигатель был оборудован скользящим контактом для измерения напряжения ротор-статор (рис. 8). В ходе этих сравнительных испытаний кроме мест с увеличенными механическими нагрузками на элементы тягового привода были зафиксированы перенапряжения на подшипниках двигателя, время изменения которых находилось в диапазоне 1–10 мкс (рис. 9).

Из [1] известно, что амплитуды напряжений свыше 50 В с микросекундными провалами являются источником паразитного подшипникового тока. Для ограничения величины этого тока после проведения сравнительных испытаний часть тяговых электродвигателей в опытном порядке была оснащена гибридными подшипниками. В таких подшипниках при сохранении установочных размеров обеспечивается большее значение электрического сопротивления, а также значения емкости, примерно в 100 раз меньше, чем у подшипников с керамическим покрытием (применяемых на тяговых электродвигателях при их изготовлении). С момента начала опытной эксплуатации подшипников с керамическим покрытием выхода их из строя до настоящего времени не зафиксировано.

В заключение необходимо отметить, что проблема электроожогов подшипников присуща как подшипникам букс, так и подшипникам тягового электропривода. Для ограничения уравнивающих токов, которые замыкаются через элементы механической части и экраны кабелей межвагонных переходов, все колесные пары электрически изолированы от рам тележек. Выявлено, что при нарушении изоляции колесных пар по подшипникам протекают токи, по величине сравнимые с током потребления электропоезда. Электрически изолированными

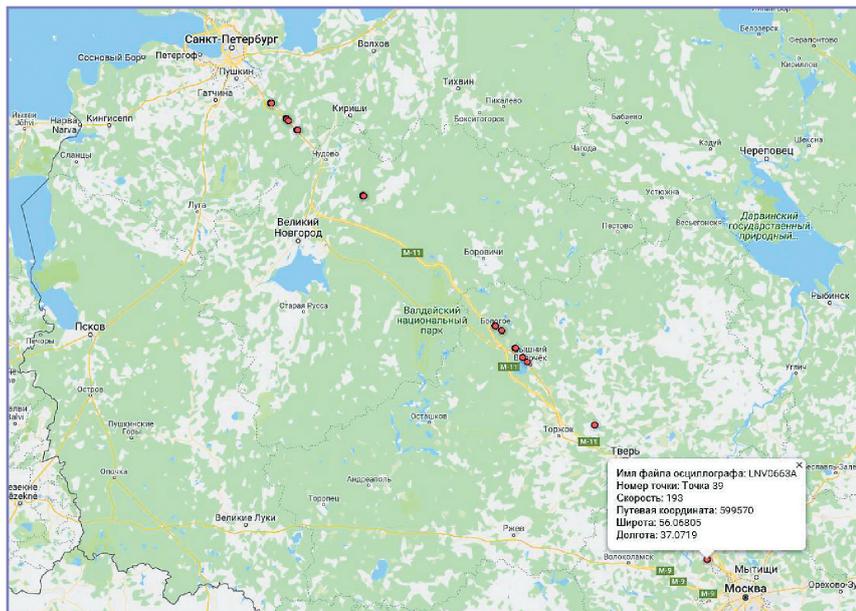


Рис. 7. Места наличия уравнительных токов на участке Санкт-Петербург – Москва

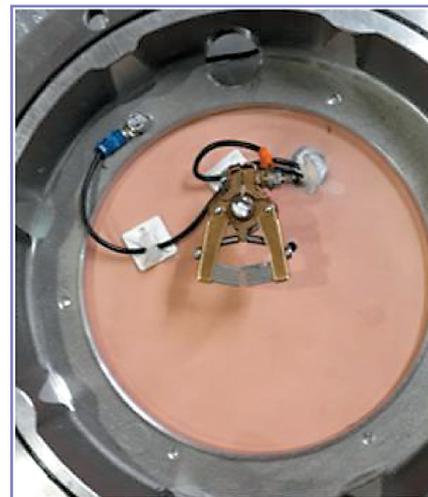


Рис. 8. Измерительная щетка с неприводной стороны двигателя

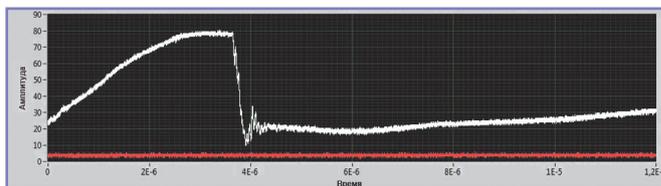
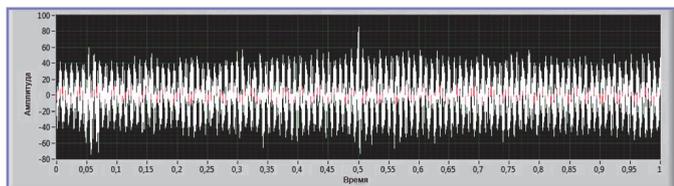


Рис. 9. График изменения напряжения на валу за 1 с и укрупненный всплеск напряжения до 80 В

выполнены также подшипники тяговых электродвигателей. При изготовлении двигателей были применены подшипники с керамическим покрытием наружного кольца, однако проведенные измерения показали неэффективность такого вида изоляции. Для уменьшения подшипниковых токов в настоящее время проводится опытная эксплуатация гибридных подшипников, где тела качения выполнены из керамических материалов. Выхода из строя модернизированных подшипников до настоящего времени не зафиксировано.

Литература

1. Hans Tischmacher. Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Walzlägern bei umrichter gespeisten Elektromotoren. Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover zur Erlangung des akademischen Grades doktor-ingenieur genehmigte dissertation. 237 S. 2017.

Лысов Николай Владимирович

Родился в 1973 году. В 1999 году окончил ПГУПС по специальности «Локомотивы (электровозы и электропоезда)». Кандидат технических наук. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Снижение влияния на рельсовые цепи тягового привода электропоезда с автономным инвертором тока». Опыт работы – 27 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 14 научных трудов и 1 патент.

Брагин Александр Геннадьевич

Родился в 1967 году. В 1994 году окончил ПГУПС по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук. В 2001 году защитил диссертацию по теме

«Ограничение бросков тока в тяговом приводе электроподвижного состава с микропроцессорным управлением импульсным регулятором напряжения». Опыт работы – 33 года. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 10 научных публикаций.

Володин Анатолий Александрович

Родился в 1961 году. В 1985 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 1992 году защитил диссертацию по теме «Система микропроцессорного управления частотнорегулируемым электроприводом в режиме торможения». Опыт работы – 33 года. В настоящее время работает доцентом ПГУПС. Имеет более 30 научных работ.

Ивашенко Валерий Олегович

Родился в 1965 году. В 1988 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Алгоритмизация определения энергосберегающих режимов ведения пригородных электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 31 год. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС.

Lysov Nikolay

Was born in 1973. In 1999 he graduated from PGUPS majoring in "Railroad engines (electric locomotives and electric multiple-unit trains)". Candidate of engineering sciences. In 2004 he defended the dissertation with topic "Reducing of influence on signal track circuit of pulling drive of electric multiple-unit train

with self-commutated inverter of current". He has 27 years of work experience. At present he works as associate professor of Electric operation department of PGUPS. He has 14 scientific works and 1 patent.

Bragin Alexander

Was born in 1967. In 1994 he graduated from PGUPS majoring in "Electrification of rail transport". Candidate of engineering sciences. In 2001 he defended the dissertation with topic "Limitation of in-rush of current in pulling drive of microprocessor-controlled electric motive power and switch regulator of voltage". He has 33 years of work experience. At present he works as associate professor of Electric operation department of PGUPS. He has 10 scientific publications.

Volodin Anatoliy

Was born in 1961. In 1985 he graduated from Leningrad State Transport University majoring in "Electrification of rail transport". Candidate of engineering sciences, associate professor. In 1992 he defended the dissertation with topic "The system of microprocessor control of variable-frequency electric drive in mode of brake". He has 33 years of work experience. At present he works as associate professor of PGUPS. He has more than 30 scientific works.

Ivashchenko Valeriy

Was born in 1965. In 1988 he graduated from Leningrad State Transport University majoring in "Electrification of rail transport". Candidate of engineering sciences, associate professor. In 2000 he defended the dissertation with topic "Detection algorithmization of energy saving mode of direct current suburban electric train maintaining". He has 31 years of work experience. At present he works as associate professor of Electric operation department of PGUPS.

Средства текущего контроля состояния элементов аккумуляторной батареи пассажирского вагона

// Means of current monitoring of the elements state of a passenger car battery //

**Никитин В. В., д.т.н., доцент,
Середа Г. Е., к.т.н., доцент,
Трифонов Б. А., к.т.н., доцент,
Цаплин А. Е., к.т.н.,
ПГУПС, Санкт-Петербург**

Сегодня на железных дорогах эксплуатируется значительное количество пассажирских вагонов, оборудованных кислотными или щелочными аккумуляторными батареями. Задача контроля текущего состояния каждого элемента в составе аккумуляторной батареи является актуальной. В настоящей статье предложены новые технические решения для системы контроля аккумуляторной батареи, позволяющие оценивать состояние каждого элемента батареи по двум параметрам: уровню электролита и величине разрядного напряжения с выдачей сигнала о возникшей неисправности на пульт проводника вагона.
Ключевые слова: пассажирский вагон, аккумуляторная батарея, средства контроля.

Для энергообеспечения потребителей электрической энергии пассажирских вагонов могут использоваться автономная, централизованная и смешанная системы электроснабжения [1, 2]. В автономных системах электроснабжения на каждом вагоне используются два источника электрической энергии: подвагонный генератор постоянного или переменного тока с приводом от оси колесной пары, являющийся основным источником энергии, и аккумуляторная батарея, выполняющая функции вспомогательного источника. При смешанной системе электроснабжения в дополнение к подвагонному генератору и аккумуляторной батарее используется высоковольтная поездная магистраль, по которой энергией обеспечивается система комбинированного отопления вагона. При централизованной системе электроснабжения основным источником энергии является вагон-электростанция, включаемая в состав поезда, или локомотив, от которых энергия поставляется потребителям по высоковольтной поездной магистрали; в этом случае на вагоне также размещается аккумуляторная батарея.

Существенную долю парка пассажирских вагонов составляют вагоны с автономной и смешанной системами электроснабжения, в которых подвагонный генератор обеспечивает питание потребителей энергии при скоростях движения выше 25–30 км/ч. Аккумуляторная батарея в таких системах обеспечивает питание потребителей при стоянке и малых скоростях движения, а также покрытие пиковых нагрузок. В настоящее время для энергообеспечения пассажирских вагонов широко используются щелочные и кислотные батареи, емкость которых

может составлять до 400 А·ч. В эксплуатации батареи такого типа требуют периодического контроля уровня электролита и напряжения каждого аккумуляторного элемента, что существенно усложняет и удорожает обслуживание батареи. На пассажирских вагонах последних лет выпуска применяются батареи из герметичных гелевых элементов [3, 4], которые не требуют контроля уровня электролита, однако задача контроля напряжения каждого элемента для таких батарей остается актуальной.

Keywords: passenger car, battery, means for control.

может составлять до 400 А·ч. В эксплуатации батареи такого типа требуют периодического контроля уровня электролита и напряжения каждого аккумуляторного элемента, что существенно усложняет и удорожает обслуживание батареи. На пассажирских вагонах последних лет выпуска применяются батареи из герметичных гелевых элементов [3, 4], которые не требуют контроля уровня электролита, однако задача контроля напряжения каждого элемента для таких батарей остается актуальной.

Текущий контроль уровня электролита аккумулятора в составе батареи

Аккумуляторная батарея пассажирского вагона должна обеспечивать надежность функционирования и стабильность параметров во всех условиях эксплуатации. Свойства батареи, такие как емкость, внутреннее сопротивление, напряжение заряда и разряда, определяются параметрами аккумулятора с худшими характеристиками. Это приводит к тому, что при формировании батареи необходимо выполнять предварительный отбор аккумуляторов по их характеристикам, что усложняет и удорожает технологический процесс. Кроме этого, при эксплуатации батареи необходимо периодически осуществлять контроль уровня и плотности электролита в каждом аккумуляторе. Такой контроль зачастую также является весьма трудоемким, поскольку требует осмотра каждого аккумулятора в батарее и может выполняться только в условиях вагонного депо. Частично проблема может быть решена установкой на корпусе аккумулятора сигнального светодиода, информирующего о нарушении уровня

электролита, однако данное техническое решение также требует осмотра батареи под вагоном, что реализуемо только при длительной стоянке.

Один из вариантов, позволяющих контролировать уровень электролита в аккумуляторе в режиме текущего времени, – когда сигнал о нарушении уровня электролита выводится на пульт проводника вагона. Схема, реализующая такой текущий контроль, представлена на рис. 1. Последовательно со светодиодом VD1, который установлен на аккумуляторе, включена диодная оптопара VU1. Выходной сигнал этой оптопары поступает на вход усилительного каскада на микросхеме DA1, на выходе которого формируется сигнал о нарушении уровня электролита, поступающий на пульт проводника.

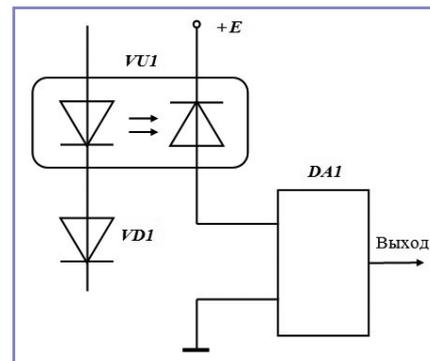


Рис. 1. Устройство текущего контроля уровня электролита аккумулятора

Текущий контроль напряжения аккумулятора в составе батареи

Второй аспект проблемы заключается в необходимости контроля напряжения на каждом элементе аккумуляторной батареи. Существующая система контроля определяет напряжение всей батареи и никак не оценивает состояние каждого аккумулятора, что может приводить к значительному сокращению сроков службы как отдельных аккумуляторов, так и батареи в целом.

Существующие методы измерения напряжения аккумулятора в составе батареи основаны на использовании аккумуляторного пробника (нагрузочной вилки). Пробник содержит нагрузочное сопротивление, величина которого определяет получение пятиминутного разрядного тока исследуемого аккумулятора [5, 6]. Предварительно батарею необходимо отключить от системы электроснабжения вагона, при этом вольтметр пробника покажет напряжение исследуемого аккумулятора. Это снижает точность контроля его состояния и требует проверки всех аккумуляторных элементов батареи, что возможно только в условиях депо.

Текущий контроль напряжения аккумулятора в составе батареи при ее работе в системе электроснабжения пассажирского вагона может осуществляться с помощью схемы, представленной на рис. 2. К выводам каждого аккумулятора подключается цепь, содержащая резистор $R1$, базовую цепь транзистора $VT1$ и ключ электроинного коммутатора K , осуществляющий гальваническую развязку аккумуляторов в батарее. В коллекторную цепь транзистора $VT1$ включен передающий светодиод оптрона $VU1$, приемный фотодиод оптрона включен в базовую цепь транзистора $VT2$. В коллекторную цепь $VT2$ включен информационный светодиод $VD2$, передающий сигнал на пульт проводника вагона о низком напряжении на контролируемом аккумуляторе.

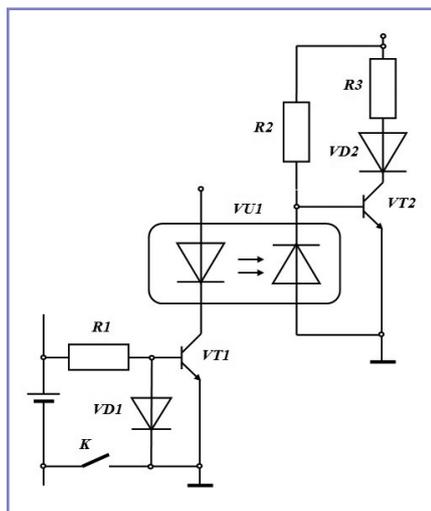


Рис. 2. Устройство текущего контроля напряжения аккумулятора в составе батареи

При снижении напряжения аккумулятора ниже допустимого значения базовый ток транзистора $VT1$ снижается, что приводит к снижению тока его коллектора до величины, при которой погасает светодиод оптрона $VU1$. Это приводит к открытию транзистора $VT2$ и включению информационного светодиода $VD2$, который располагается на пульте управления проводника и выдает сигнал об аварийном состоянии аккумулятора батареи. Возможен также вариант формирования дублирующего аварийного сигнала, при котором последний будет выводиться на каждый аккумулятор батареи, расположенной в аккумуляторном ящике под вагоном, что значительно упростит работу обслуживающего персонала депо и сократит время ремонта батареи.

Выводы

В настоящее время значительную долю эксплуатируемого парка пассажирских вагонов составляют вагоны с кислотными и щелочными аккумуляторными батареями. Для повышения надежности их функционирования и своевременного выявления неисправных аккумуляторов целесообразно осуществлять текущий контроль уровня электролита и напряжения каждого аккумулятора в составе

батареи. Предложенные схемные решения средств текущего контроля позволяют в режиме реального времени контролировать техническое состояние каждого аккумулятора и при возникновении неисправности выводить сигнал на пульт проводника вагона.

Литература

1. Комаров Ю.И. Электроснабжение пассажирских вагонов / Ю.И. Комаров // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2007, № 1, с. 41–54.
2. Бурдасов Б.К. Системы электроснабжения и преобразователи для пассажирских вагонов / Бурдасов Б.К., Нестеров С.А. // Вагонный парк, 2012, № 6, с. 33–39.
3. Гратий В.И. Необслуживаемая батарея для пассажирских вагонов / В.И. Гратий, К.Г. Максюты // Вагонный парк, 2009, № 2, с. 28–31.
4. Шапот М.Б. Необслуживаемая аккумуляторная батарея для пассажирских железнодорожных вагонов / М.Б. Шапот, Б.И. Ужинов // Электрохимическая энергетика, 2007, № 1, т. 7, с. 42–46.
5. Зорохович А.Е., Бельский В.П., Эйгель Ф.И. Устройства для заряда и разряда аккумуляторных батарей. – М.: Энергия, 1975. – 207 с.
6. Ким К.К. Средства электрических измерений и их поверка / К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, А.И. Чураков; под ред. К.К. Кима. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 316 с.

Никитин Виктор Валерьевич

Родился в 1966 году. В 1988 году окончил электромеханический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. Доктор технических наук, доцент. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Теоретические исследования электромагнитной совместимости сверхпроводникового оборудования с электрооборудованием традиционного исполнения». Опыт работы – 31 год. В настоящее время работает профессором кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС. Имеет около 80 научных трудов, включая патенты на полезные модели и свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Серета Геннадий Евгеньевич

Родился в 1950 году. В 1973 году окончил факультет электронных устройств и вычислительной техники Ленинградского института авиационного приборостроения. Кандидат технических наук, доцент. В 1993 году защитил диссертацию по теме «Разработка тоководов для транспортных сверхпроводящих магнитных систем». Опыт работы – 45 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС. Имеет свыше 70 научных трудов, включая патенты на изобретения и полезные модели.

Трифонов Борис Алексеевич

Родился в 1945 году. В 1969 году окончил электромеханический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. Кандидат технических наук, доцент. В 1997 году защитил диссертацию по теме «Разработка статических преобразователей для питания нетяговых потребителей городского электротранспорта с отбором мощности от контактной сети». Опыт работы – 51 год. В настоящее время работает до-

центом кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС. Имеет около 60 научных трудов, включая патенты на изобретения и полезные модели.

Цаплин Алексей Евгеньевич

Родился в 1986 году. В 2008 году окончил ПГУПС по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование методов контроля деталей механической части электроподвижного состава применением оптико-электронных средств». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 40 научных трудов.

Nikitin Viktor

Was born in 1966. In 1988 he graduated from electromechanical faculty of the Leningrad Institute of Railway Engineers. Doctor of technical sciences, associate professor. In 2004 he defended his thesis on the topic "Theoretical studies of the electromagnetic compatibility of superconducting equipment with traditional-style electrical equipment". Has 31 years of working experience. At present he is a professor of Electrical engineering and power engineering department of PGUPS. He has about 80 scientific papers, including patents for utility models and certificates for registration of computer programs.

Sereda Gennadiy

Was born in 1950. In 1973 he graduated from faculty of electronic devices and computers of the Leningrad Institute of Aviation Instrumentation. Candidate of technical sciences, associate professor. In 1993 he defended his thesis on the topic "Development of current leads for transport superconducting magnetic systems". Has 45 years of working experience. At present he is an associate professor of Electrical engineering and power engineering department of PGUPS. He has over 70 scientific papers including patents for inventions and utility models.

Trifonov Boris

Was born in 1945. In 1969 he graduated from electromechanical faculty of the Leningrad Institute of Railway Engineers. Candidate of technical sciences, associate professor. In 1997 he defended his thesis on the topic "Development of static converters for power supply to non-hauling consumers of urban electric transport with power take-off from the contact network". Has 51 years of working experience. At present he is an associate professor of Electrical engineering and power engineering department of PGUPS. He has about 60 scientific papers, including patents for inventions and utility models.

Tsaplin Alexey

Was born in 1986. In 2008 he graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in "Electric transport of railroad". Candidate of engineering sciences. In 2011 he defended the dissertation with topic "Improvement of control methods of mechanical section component parts of electric motive power with application of optronic equipment". He has 11 years of work experience. At present he works as associate professor of Electric traction department of PGUPS. He has more than 40 scientific works.

Интеллектуальная система управления тяговым приводом постоянного тока

// Direct current traction drive intelligent control system //

Грачев В. В., к. т. н., доцент, Курилкин Д. Н., к. т. н., доцент,
Грищенко А. В., д. т. н., профессор, Кручек В. А., д. т. н., профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург
Бабков Ю. В., к. т. н., Перфильев К. С., к. т. н., Евсеев В. Ю.,
АО «ВНИКТИ», Коломна, Московская обл.

Приведено описание инновационного унифицированного многоканального тягового преобразователя с импульсными регуляторами тока тяговых электродвигателей на базе IGBT-транзисторов. Преобразователь предназначен для модернизации электрической передачи переменного-постоянного тока тепловозов и электровозов с тяговыми электродвигателями постоянного тока. Применение преобразователя обеспечивает плавное поосное регулирование силы тяги и тормозного усилия локомотива без использования групповых контакторов ослабления поля, тормозных контакторов, резисторов ослабления поля и пусковых резисторов на электровозах.

Ключевые слова: тяговый преобразователь, поосное регулирование силы тяги, локомотив, электродинамический тормоз, тяговые свойства, коэффициент мощности.

Система поосного регулирования силы тяги (СПРСТ), применяемая на всех современных грузовых тепловозах отечественного производства (2ТЭ116У (Д, М), 2ТЭ70, 2ТЭ25К(2) М, 2ТЭ25А), обеспечивает существенное повышение противобоксовочных, а следовательно, и тяговых свойств тепловоза. Опыт эксплуатации новых локомотивов на ряде железных дорог – филиалов ОАО «РЖД» подтверждает ее высокую эффективность [1, 2].

Управляемый многоканальный тяговый выпрямитель М-ТПП-3600М-1-У2 представляет собой эффективный быстродействующий инструмент индивидуального управления моментом тяговых электродвигателей, позволяющий решать самые сложные задачи, связанные с повышением тяговых свойств тепловоза (ограничением проскальзывания колесных пар) при работе его в зоне ограничения по сцеплению. Именно отсутствие такого механизма всегда являлось фактором, существенно ограничивающим тяговые свойства тепловоза при скоростях, близких к расчетным.

Вместе с тем опыт эксплуатации систем СПРСТ выявил целый ряд недостатков, не позволяющих в полной мере реализовать преимущества индивидуального управления тяговыми электродвигателями (ТЭД).

Выпрямитель М-ТПП-3600М-1-У2 включает шесть полностью управляемых трехфазных тиристорных преобразователей, каждый из которых управляется отдельным модулем устройства обработки информации (УОИ) бортовой микропроцессорной системы управления

The article is devoted to innovative unified multichannel traction IGBT converter with current pulse controllers. It intended for modernization of electric and diesel-electric locomotives traction transmission. The new converter allows a smooth axel traction and brake effort control without uses of group field shunting contactors, brake contactors, field shunting resistors, starter contactors and resistors on electric locomotives.

Keywords: traction converter, axel traction effort control, locomotive, electric brake, traction characteristic, power coefficient.

тепловоза (МСУ). Для управления каждым из 36 тиристорных выпрямителя используется отдельная плата формирователя импульсов (ПФИ), питаемая высокочастотным напряжением и требующая синхронизации с силовой питающей сетью. Такая сложная система управления снижает как элементную, так и параметрическую надежность силовой цепи тепловоза, поскольку вследствие технологического разброса параметров как элементов ПФИ, так и самих тиристорных при питании трех преобразователей от одной «звезды» статорной обмотки синхронного тягового генератора в эксплуатации и в процессе реостатных испытаний нередко имеет место нарушение токораспределения ТЭД [3]. Кроме того, высокочастотные цепи

питания плат ПФИ создают недопустимо высокий уровень радиопомех.

Габаритно-присоединительные размеры и масса управляемой выпрямительной установки существенно выше неуправляемого выпрямительного блока, используемого в электроприводах без поосного регулирования силы тяги. Для ступенчатого управления возбуждением ТЭД используются два шестиполюсных электропневматических контактора и шесть ленточных сопротивлений. В случае использования электродинамического торможения в силовую схему дополнительно вводятся шесть силовых диодов и тормозной переключатель.

Выпрямитель М-ТПП-3600М-1-У2 не может использоваться в силовых схемах тепловозов с электрической передачей постоянно-постоянного тока. Между тем значительный объем грузовых перевозок на сети ОАО «РЖД» выполняется тепловозами серии 2ТЭ10М(У)К, для которых проблема повышения тяговых и сцепных свойств является весьма актуальной [4].

С целью исключения указанных недостатков и расширения функциональных возможностей тягового электропривода постоянно-постоянного тока в АО «ВНИКТИ» разработан и испытан унифицированный многоканальный тяговый преобразователь (ТП) с импульсными регуляторами тока ТЭД на базе IGBT-транзисторов, получивший рабочее название «КЛИПЕР».

На рис. 1 представлена блок-схема канала нового преобразователя.

В режиме тяги при отсутствии боксования возможна работа схемы в двух режимах. Первый режим: транзистор VT1 полностью открыт, транзисторы VT2, VT3 закрыты. При этом регулирование напряжения на двигателе М осуществляется только за счет изменения напряжения тягового генератора, как и в схеме с параллельным включением ТЭД. При боксовании данной колесной пары напряжение на ней индивидуально снижается за счет работы VT1 в режиме ШИМ-модуляции. При этом силовой

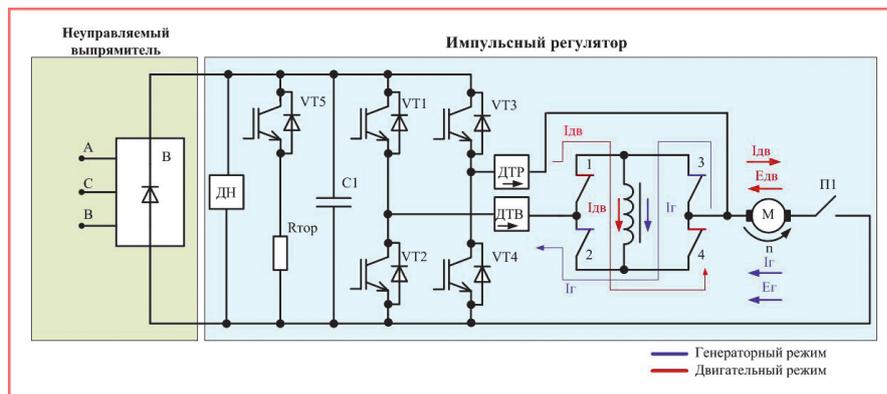


Рис. 1. Блок-схема канала тягового преобразователя «КЛИПЕР»

ток двигателя М после отключения VT1 замыкается через диод нижнего транзистора VT2. Второй режим – напряжение тягового генератора выводится на максимально возможное значение на текущей позиции контроллера, а напряжение на двигателе М регулируется за счет ШИМ-модуляции транзистором VT1 в режиме тяги как без боксования, так и при боксовании. Преимущество второго способа в том, что возможно снижение токовой нагрузки на тяговый генератор в 1,5–2 раза, что повышает его КПД и позволяет во столько же раз снизить сечение силовых проводов от тягового генератора до силовой выпрямительной установки В.

В режиме ослабления поля ТЭД в работу включается транзистор VT3, который изменением скважности импульсов ШИМ-сигнала обеспечивает практически независимое регулирование токов якоря и обмотки возбуждения двигателя, что увеличивает жесткость его механической характеристики и способствует повышению тяговых свойств локомотива. Возможность реализации постоянного тягового и тормозного усилия при неблагоприятных условиях сцепления (в качестве первой ступени противобоксовочной и противоюзной защиты) позволяет увеличить силу тяги тепловоза при работе в зоне ограничения по сцеплению не менее чем на 6–10%.

В режиме электрического торможения с последовательным возбуждением тяговых двигателей реверсор предварительно переводится в противоположное двигательному режиму состояние, транзистор VT1 закрыт, транзистор VT2 работает в режиме ШИМ-модуляции. За счет остаточного потока и работы транзистора VT2 производится быстрое самовозбуждение двигателя М, заряд конденсатора в звене постоянного тока С1 до значения напряжения, обеспечивающего закрытое состояние диодов выпрямительной установки В с целью исключения питания тормозных резисторов от генератора, который возбуждается в режиме торможения для питания вентиляторов, подключенных к его тяговым обмоткам. После достижения напряжения на С1 до требуемого уровня транзистор VT3 совместно с VT2 поддерживают необходимый тормозной ток и напряжение в звене постоянного тока, регулируя тем самым мощность (силу) торможения.

В зоне ползучих скоростей при небольшой тормозной мощности в качестве тормозного резистора используется активное сопротивление обмоток ТЭД, что обеспечивает возможность сохранения тормозного усилия практически до остановки тепловоза. Этот вывод полностью подтверждается результатами стендовых испытаний преобразователя.

На рис. 2 приведена схема силовой цепи тепловоза с электропередачей как переменного постоянного (2ТЭ116), так и постоянно-постоянного (2ТЭ10МК) тока с системой СРСТ на базе тягового преобразователя «КЛИПЕР» (в последнем случае тяговый генератор подключается к выходу звена В постоянного тока преобразователя). Как следует из рисунка, силовая схема существенно упрощается за счет исключения из нее:

- групповых контакторов ослабления поля;
- ленточных сопротивлений ослабления поля;
- тормозного переключателя;

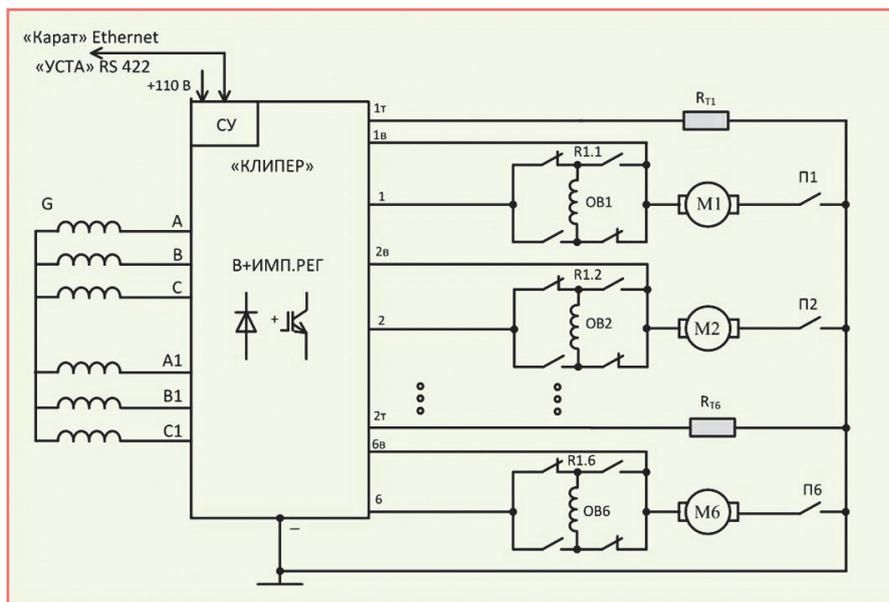


Рис. 2. Схема силовой цепи тепловоза с СПРСТ на базе тягового преобразователя «КЛИПЕР»

- силовых проводов системы ослабления поля (100%) и электродинамического торможения (80%);
- измерительного шунта тока тягового генератора.

Исключение из силовой схемы целого ряда дорогостоящих коммутационных электрических аппаратов снижает расходы как на ее модернизацию, так и на техническое обслуживание силового электрооборудования в процессе эксплуатации локомотива.

Замечательная способность нового преобразователя работать при постоянном напряжении силового питания открывает широкие возможности использования его для модернизации не только тепловозов, но и электровозов с электродвигателями постоянного тока.

На рис. 3 приведена схема включения канала «КЛИПЕР» в силовую схему электровоза ВЛ80, а на рис. 4 – схема силовой цепи электровоза ВЛ80 с системой СРСТ на базе ТП «КЛИПЕР».

Результаты моделирования показывают: помимо упрощения силовой схемы электровоза и увеличения на 5–7% его тяговых свойств использование ТП «КЛИПЕР» обеспечивает повышение коэффициента мощности на стороне высокого напряжения до 0,95 в режимах тяги и рекуперативного торможения при одновременном симметрирующем воздействии на форму напряжения в контактной сети (рис. 5).

Дополнительные возможности увеличения тяговых свойств локомотивов достигаются при использовании ТП «КЛИПЕР» совместно с интеллектуальной системой обнаружения боксования колесных пар [5]. Данная система обеспечивает обнаружение повышенного проскальзывания колесных пар на ранних стадиях процесса перехода от тяги к боксованию, что в сочетании с быстроедействием нового преобразователя и его широкими возможностями в части управления моментом ТЭД позволяет существенно повысить тяговые свойства локомотива не только за счет своевременного обнаружения повышенного проскальзывания колесных пар и его ликвидации без существенного снижения силы тяги, но и за счет реализации алгоритмов активного управления проскальзыванием колесных пар [6].

Таким образом, предложенная схема тягового электропривода позволяет:

- сохранить все положительные функции системы поосного регулирования силы тяги и одновременно упростить схему тягового электропривода;
- повысить ее надежность за счет замены шести управляемых тиристорных мостов на один неуправляемый, снижения количества полупроводниковых приборов и драйверов управления ими;
- упростить систему управления тяговым приводом за счет исключения схемы

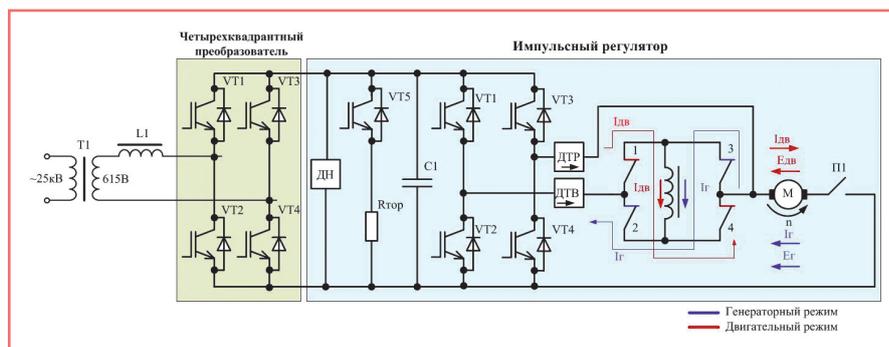


Рис. 3. Схема канала управления тяговым электродвигателем электровоза ВЛ80 с использованием ТП «КЛИПЕР»

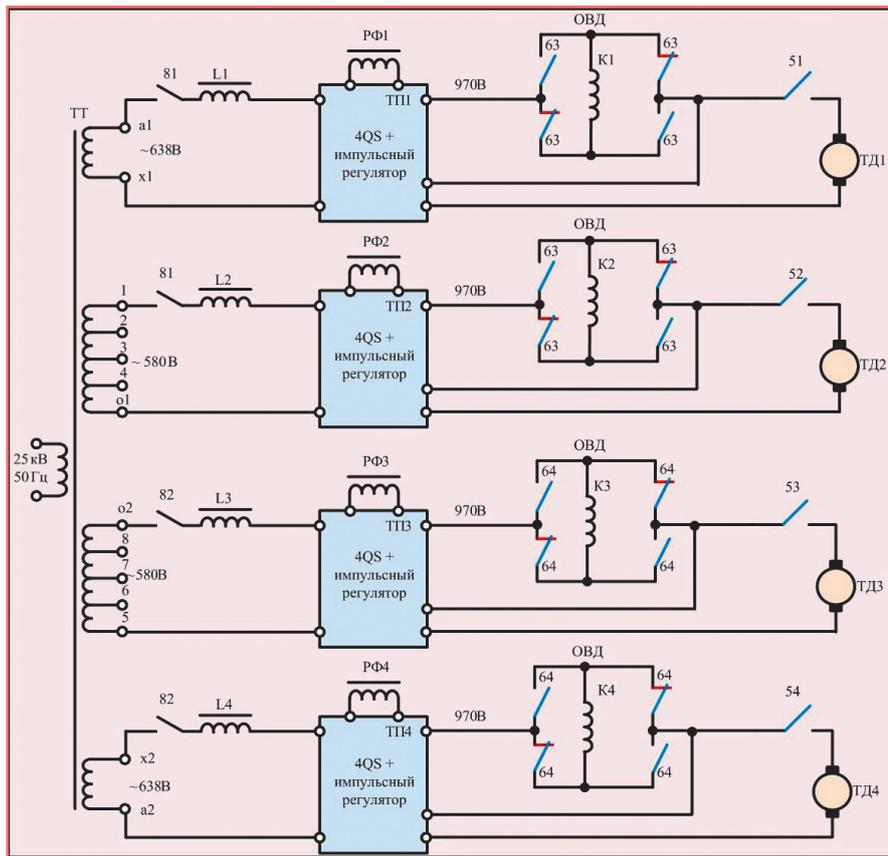


Рис. 4. Схема силовой цепи электровоза ВЛ80 с СПРСТ на базе ТП «КЛИПЕР»

управления тиристорами, требующей синхронизации с питающей сетью, кабелей и разъемов для передачи 36 управляющих импульсов и шести сигналов синхронизации, трансформаторов синхронизации;

- упростить схему силовой цепи за счет исключения групповых контакторов ослабления поля, резисторов ослабления поля, тормозного переключателя, значительного количества соединительных проводов;

- обеспечить бесконтактный способ переключения тягового электропривода из

режима тяги в режим реостатного торможения с последовательным возбуждением двигателей и эффективным регулированием тормозного момента, отказаться от тормозных контакторов;

- обеспечить связь с системой управления верхнего уровня только по последовательному каналу (Ethernet или CAN);

- обеспечить отсутствие радиопомех, формируемых системой управления, повысить помехоустойчивость управления транзисторами за счет использования линий

связи и применения стандартных, хорошо отработанных драйверов, которые осуществляют автоматический мониторинг работоспособности транзисторов (их диагностики);

- выполнить быстродействующую защиту силового выпрямителя (не сгорают предохранители) при коротких замыканиях за счет отключения двигателя посредством закрытия IGBT-транзистора;

- обеспечить лучшую форму тока в тяговых двигателях (меньше пульсации) за счет применения высокочастотной ШИМ (1 кГц);

- обеспечить автоматическое равномерное распределение токов по тяговым двигателям во всех режимах работы силовой цепи (полное поле, ослабленное поле, торможение);

- обеспечить возможность трогания тепловоза с большей величиной напряжения тягового генератора и регулирования тяги за счет ШИМ, благодаря чему снизить ток нагрузки тягового генератора, увеличить его КПД, обеспечить более эффективную работу вентиляторов охлаждения тяговых двигателей, что позволяет повысить величину длительной силы тяги при низких скоростях движения тепловоза, снизить сечение силовых питающих проводов;

- для обеспечения режима торможения нет необходимости питать обмотки возбуждения, затрачивая при этом энергию от тяговой установки тепловоза;

- использовать минимальное количество датчиков тока (9 шт.) и напряжения (1 шт.);

- снизить массогабаритные показатели выпрямительной установки;

- уменьшить затраты на техническое обслуживание оборудования за счет уменьшения количества силовых коммутационных аппаратов, упрощения схемы преобразователя и применения средств его внутренней диагностики;

- повысить тяговые и тормозные свойства локомотива за счет индивидуального управления проскальзыванием колесных пар как в режиме тяги, так и в режиме электродинамического торможения;

- повысить коэффициент мощности в сети энергоснабжения.

Работа выполнена на средства гранта ОАО «РЖД» «На развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта».

Литература

1. Сергеев С. В. Электрическая схема тепловоза 2ТЭ116У / Сергеев С. В., Пархонин А. В. и др. // Локомотив, 2009, № 6, 7. – С. 22–25, 9–12.
2. Киржнер Д. Л. Тепловоз с высоким коэффициентом тяги / Киржнер Д. Л., Клименко Ю. И., Кулабухов А. С., Путинцев С. В. // Труды ВНИКТИ, 1999, вып. 7. – С. 189–198.
3. Грищенко А. В. Новым тепловозам – новые технологии реостатных испытаний / Грищенко А. В., Грачев В. В. и др. // Локомотив, 2016, № 1. – С. 11–13.
4. Пляскин А. К. Энергоэффективность тепловозов БАМа: проблемы и решения / Пляскин А. К., Новачук Я. А. // Вестник транспорта Поволжья, 2016, № 4(58) – С. 63–66.
5. Способ обнаружения боксования и юза колес транспортного средства с электрической передачей [Текст]: пат. 2657157 РФ: МПК⁷ В60L 3/10, В60L 15/10, В61С15/08, G01R23/16 / Грачев В. В., Грищенко А. В., Базилевский Ф. Ю.,

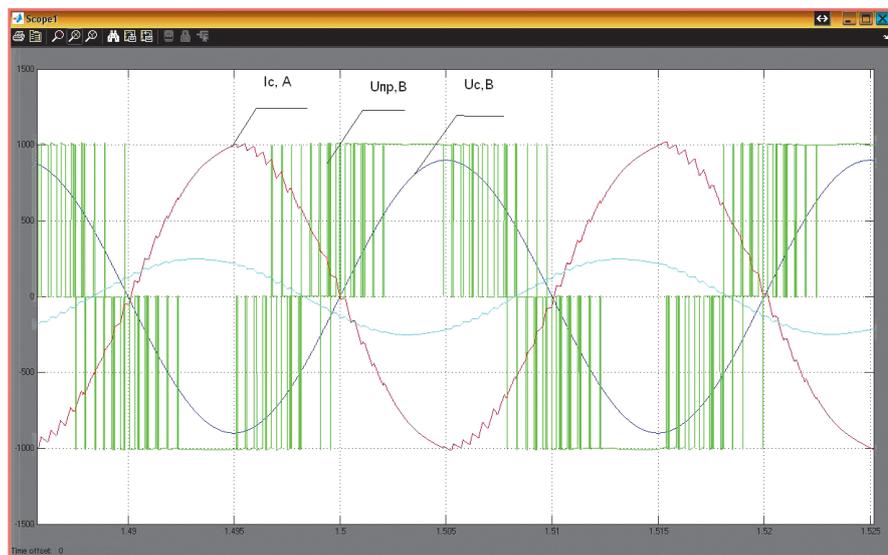


Рис. 5. Изменение напряжения и тока силовой цепи питания канала ТП «КЛИПЕР» в режиме работы «рекуперация»

Ким С.И., Федотов М.В., Титов М.В.; заявители и патентообладатели – Петербургский государственный университет путей сообщения, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава. – № 2016149490; заявл 15.12.2016; опубл. 08.06.2018, Бюл. № 16.
6. Pat. 7467830 United States, Int. Cl.7 B60 T 08/24. Managing wheel sleep in a locomotive [Text] / Frank Vegner Donnelly (North Vancouver, CA); RailPower Technologies Corp. (North Vancouver, CA). – Appl. № 11/060,221; Filed Feb. 16, 2005; Pub. Sep. 22, 2005. – 46 p.: pic.

Грачев Владимир Васильевич

Родился в 1960 году. В 1982 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Локомотивы и локомотивное хозяйство». Кандидат технических наук, доцент. В 1989 году защитил диссертацию по теме «Повышение экономичности тепловоза средствами автоматизации». Опыт работы – 38 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС.

Курилкин Дмитрий Николаевич

Родился в 1978 году. Окончил ПГУПС по специальности «Локомотивы». Кандидат технических наук, доцент. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Повышение тягово-экономических свойств локомотивов с поликарданной передачей». Опыт работы – 19 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС. Имеет 55 научных публикаций, в том числе 1 патент на изобретение, 2 патента на полезную модель и 9 свидетельств регистрации программы для ЭВМ.

Грищенко Александр Васильевич

Родился в 1952 году. В 1977 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Тепловозы и тепловозное хозяйство». Доктор технических наук, профессор. В 1996 году защитил диссертацию по теме «Повышение эффективности и экономичности тепловозов средствами микропроцессорной техники». Опыт работы – 46 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС.

Кручек Виктор Александрович

Родился в 1953 году. В 1976 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Тепловозы и тепловозное хозяйство». Доктор технических наук, профессор. В 2008 году защитил диссертацию по теме «Прогнозирование тягово-экономических свойств группового тягового привода локомотива». Опыт работы – 43 года. В настоящее время работает профессором кафе-

дры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС. Имеет более 350 научных трудов.

Бабков Юрий Валерьевич

Родился в 1965 году. В 1987 году окончил Рязанский радиотехнический институт по специальности «Радиотехника». Кандидат технических наук. В 2001 году защитил диссертацию по теме «Распределенная микропроцессорная система управления параллельной работой газодизель-генераторов переменного тока». Опыт работы – 30 лет. В настоящее время работает первым заместителем генерального директора – главным инженером АО «ВНИКТИ». Имеет более 50 научных трудов и 30 патентов.

Перфильев Константин Степанович

Родился в 1959 году. В 1982 году окончил Горьковский политехнический институт по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Кандидат технических наук. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Обоснование выбора параметров тягового преобразователя перспективных тепловозов с электрической передачей переменного тока». Опыт работы – 38 лет. В настоящее время работает заведующим отделом тяговых и вспомогательных статических преобразователей АО «ВНИКТИ». Имеет 25 научных трудов, 16 патентов.

Евсеев Вячеслав Юрьевич

Родился в 1989 году. В 2011 году окончил Московский государственный открытый университет по специальности «Управление и информатика в технических системах». Опыт работы – 9 лет. В настоящее время работает заведующим сектором перспективных разработок АО «ВНИКТИ».

Grachev Vladimir

Was born in 1960. In 1982 he graduated from Leningrad Institute of Railway Engineers with a degree in "Locomotives and locomotive facilities". Candidate of technical sciences, associate professor. In 1989 he defended his thesis on the topic "Gain in performance of gasoline locomotive by means of automation equipment". Work experience is 38 years. At present he works as an associate professor at the department of "Locomotives and locomotive facilities" of PGUPS.

Kurilkin Dmitriy

Was born in 1978. He graduated from PGUPS with a degree in "Locomotives". Candidate of technical sciences, associate professor. In 2004 he defended his thesis on the topic "Improvement of pulling and economic properties of locomotives with polycardan drive". Work experience is 19 years. At present he works as a chairman at the department of "Locomotives and locomotive facilities" of PGUPS. He has 55 scientific publications including 1 patent

for invention, 2 useful model patents and 9 registration licenses for computer software.

Grishchenko Alexander

Was born in 1952. In 1977 he graduated from the Leningrad Institute of Railway Engineers with a degree in "Diesel locomotives and diesel locomotive facilities". Doctor of technical sciences, professor. In 1996 he defended his thesis on the topic "Improving the efficiency and economy of diesel locomotives using microprocessor technology." Work experience is 46 years. At present he is as a professor at the department of "Locomotives and locomotive facilities" of PGUPS.

Kruchek Viktor

Was born in 1953. In 1976 he graduated from the Leningrad Institute of Railway Engineers with a degree in "Diesel locomotives and diesel locomotive facilities". Doctor of technical sciences, professor. In 2008 he defended his thesis on the topic "Forecasting the traction and economic properties of a group traction drive of a locomotive". Work experience is 43 years. At present he works as a professor at the department of "Locomotives and locomotive facilities" of PGUPS. He has over 350 scientific papers.

Babkov Yury

Was born in 1965. In 1987 he graduated from the Ryazan Radio Engineering Institute with a degree in Radio Engineering. Candidate of technical sciences. In 2001 he defended his thesis on the topic "Distributed microprocessor control system for the parallel operation of alternating current gas diesel generators". Work experience is 30 years. At present he is the first deputy general manager, chief engineer of VNIKTI JSC. He has more than 50 scientific papers and 30 patents.

Perfilyev Konsatantin

Was born in 1959. In 1982 he graduated from the Gorky Polytechnic Institute with a degree in "Electric Drive and Automation of Industrial Installations". Candidate of technical sciences. In 2005 he defended his thesis on the topic "Justification of the selection of parameters of a traction converter for promising diesel locomotives with alternating current electric transmission". Work experience is 38 years. At present he is the head of the department of traction and auxiliary static converters of VNIKTI JSC. He has 25 scientific papers, 16 patents.

Yevseyev Vyacheslav

Was born in 1989. In 2011 he graduated from Moscow State Open University with a degree in "Management and Computer Science in Technical Systems". Work experience is 9 years. At present he is the head of the sector of promising developments of VNIKTI JSC.

Компьютерное моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока

// Ac traction power network computer simulation //

Агунов А. В., д.т.н., профессор,

Марикин А. Н., д.т.н., доцент,

ПГУПС, Санкт-Петербург

Соколов Д. А.,

Октябрьская дирекция по энергообеспечению

«Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД», Санкт-Петербург

Комплекс программ КОРТЭС, широко применяемый для расчетов систем тягового электроснабжения, обладает рядом существенных недостатков. Самым главным из них является полное отсутствие наглядности производимых расчетов и возможности контроля промежуточных результатов. В связи с этим применение данного комплекса программ в научно-исследовательских целях бывает затруднительным. Одной из самых наглядных программ для моделирования электроэнергетических систем является среда MATLAB-Simulink. В работе предложена модель системы тягового электроснабжения переменного тока, состоящая из трех участков с двумя тяговыми подстанциями. Два участка имеют консольное питание, один – двухстороннее с устройством поперечной емкостной компенсации реактивной мощности, установленным в середине межподстанционной зоны. Смоделировано прохождение поездов по заданному участку с возможностью выбора интервала движения и токопотребления электротяговой нагрузки. Предложенная модель может быть использована не только в научно-исследовательских, но и в учебных целях.
Ключевые слова: электроснабжение железных дорог, системы тягового электроснабжения, электротяговая нагрузка, компенсация реактивной мощности, компьютерное моделирование.

В современном мире применение компьютерного моделирования различных процессов является одним из основных способов решения большинства задач, возникающих на производстве, при проведении научных исследований и в процессе обучения и подготовки специалистов.

В электроэнергетике применяются различные прикладные программы для расчета режимов сетей, токов короткого замыкания и иных целей. Следует отметить, что все направлены на решение своего, довольно узкого круга задач. Такие программы подходят для применения в производственных условиях, когда они используются квалифицированными специалистами, занимающимися однотипной работой.

Особое место среди прикладных программ занимает комплекс КОРТЭС, разработанный специально для расчета систем тягового электроснабжения, отличающихся рядом

The KORTES software, widely used for traction power supply system calculation, has a number of significant drawbacks. The most important of these is the complete lack of made calculations clarity and the intermediate results monitoring possibility. In this regard, the use of this software can be difficult for research purposes. One of the most illustrative programs for modeling electric power systems is MATLAB-Simulink. The model of an alternating current traction power supply system, consisting of three sections with two traction substations, is proposed in this paper. Two sections have a cantilever power supply, one is two-way with a transverse compensation device in the middle of the intersubstation area. The passage of trains in a given area with the ability to select the interval of movement and current consumption of electric traction load is simulated. The proposed model can be used not only for research, but also for educational purposes.

Keywords: railway electric power supply, traction power network, electric traction load, reactive power compensation, computer simulation.

особенностей от систем электроснабжения в общей энергетике. Благодаря довольно широкому кругу расчетов, выполняемых этим комплексом, он активно используется специалистами в области электроснабжения на железнодорожном транспорте. Методика расчетов систем тягового электроснабжения основана на вычислении требуемых параметров тяговой сети в соответствии с ее известными характеристиками с учетом перемещения поездов различной массы и интенсивности движения. Однако интерфейс комплекса программ довольно сложен и требует специальной подготовки. Кроме того, ход расчетов, производимых комплексом КОРТЭС, пользователю недоступен, что делает его применение затруднительным в учебных и научно-исследовательских целях.

На сегодняшний день разработаны и применяются для решения различных электроэнергетических задач другие, более совершенные и универсальные программы.

Одной из самых распространенных программ, применяемых при научных исследованиях в энергетике, а также при подготовке специалистов на более высоком уровне, является среда MATLAB-Simulink. Она позволяет моделировать большинство процессов, происходящих в энергосистеме, а также учесть практически все особенности систем электроснабжения. При этом применение данного пакета, способного обрабатывать большие массивы данных, требует высокой производительности компьютера, и, кроме того, отсутствует его русскоязычная версия. Но так как создание модели полностью производится самим пользователем, он имеет возможность задавать любые условия, необходимые для достижения конкретной цели [2–5].

Для специалистов в области электроснабжения на железнодорожном транспорте важную роль играет возможность создания полноценной взаимосвязи между системой тягового электроснабжения и питающей энергосистемой. Комплекс расчетов КОРТЭС в основном направлен на рассмотрение процессов внутри системы тягового электроснабжения. Более того, ввиду сравнительно небольшого значения сопротивления энергосистемы по отношению к сопротивлению системы тягового электроснабжения в расчетах им зачастую пренебрегают. Но тяговые подстанции обычно связаны между собой помимо контактной сети еще и линиями электропередачи со стороны системы внешнего электроснабжения, и упрощенное моделирование тяговых подстанций как независимых источников напряжения зачастую приводит к значительным погрешностям в расчетах.

В отличие от КОРТЭС, MATLAB-Simulink позволяет более глубоко анализировать происходящие процессы при достаточно точном моделировании элементов систем внешнего и тягового электроснабжения. Также имеется возможность свободно моделировать прохождение по межподстанционным зонам электроподвижного состава в соответствии с графиком движения и режимом токопотребления поездов.

Моделирование системы тягового электроснабжения

Схема предлагаемой модели системы тягового электроснабжения переменного тока представлена на рис. 1. Модель состоит из трех участков тяговой сети и двух тяговых подстанций. В качестве источников питания используются элементы Three-Phase Source, представляющие собой генераторы неограниченной мощности с выходным напряжением 115 кВ. Принятое допущение влечет за собой незначительную погрешность ввиду того, что сопротивление энергосистемы на шинах подстанции, весьма точно рассчитываемое специалистами региональных диспетчерских

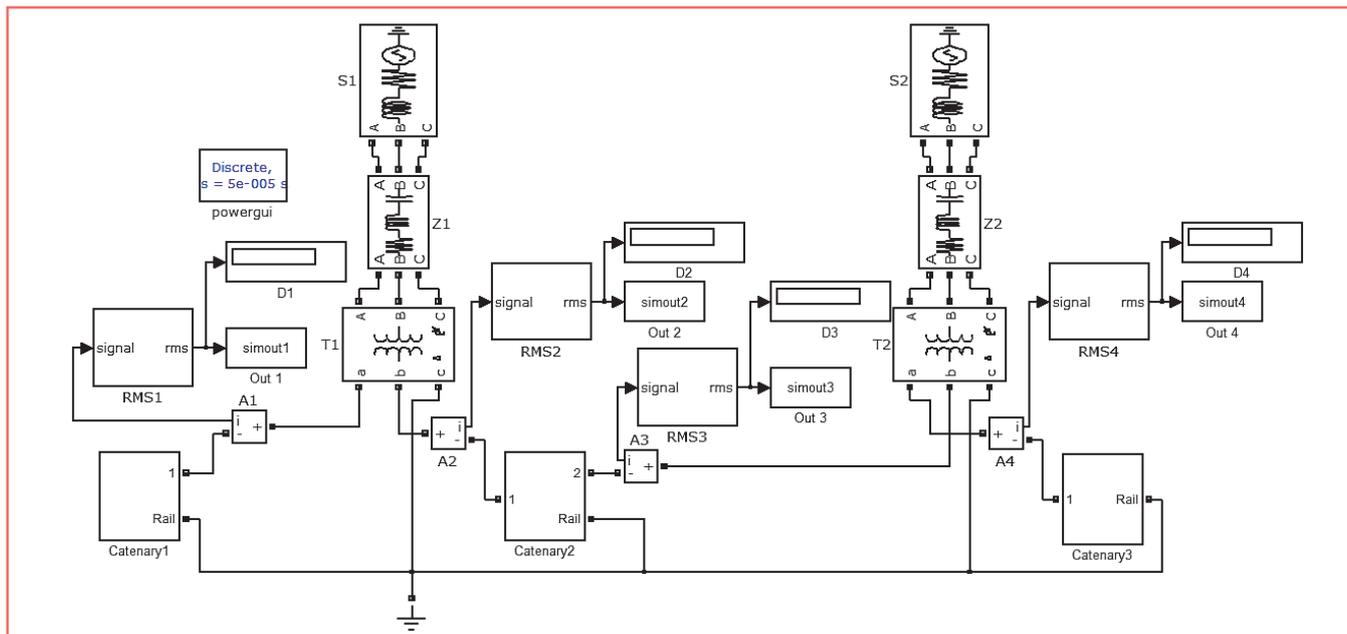


Рис. 1. Модель системы тягового электроснабжения переменного тока

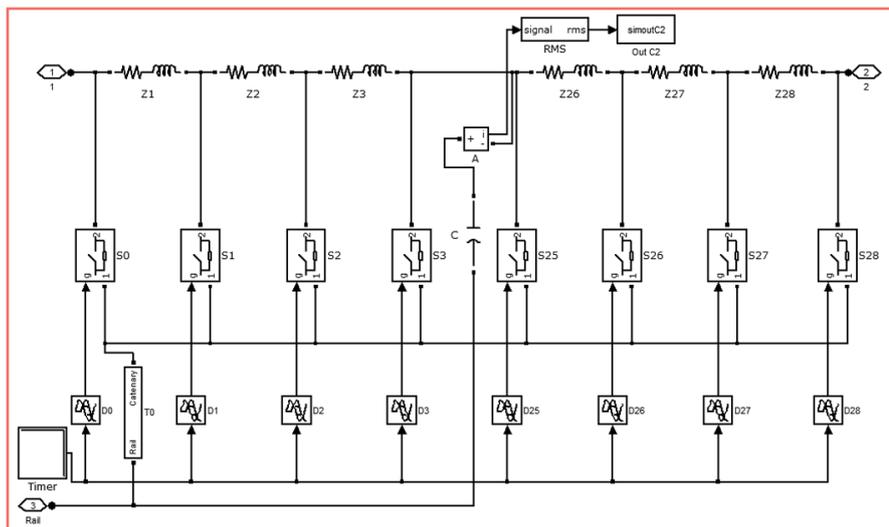


Рис. 2. Модель тяговой сети

управлений, учитывает соответствующие параметры генератора. Сопротивление энергосистемы до шин 110 кВ тяговых подстанций моделируется с помощью элементов Three-Phase Series RLC Branch. Таким образом, система внешнего электроснабжения моделируется практически без погрешностей. Понижающие трансформаторы 110/27,5 кВ представлены элементами Three-Phase Transformer с соответствующими характеристиками.

Участки тяговой сети вместе с электротяговой нагрузкой смоделированы подсистемами Catenary (рис. 2), подключаемыми к трансформаторам и рельсу. В плечах трансформаторов установлены измерительные приборы, среднеквадратичные показания которых через преобразователи RMS отображаются на дисплеях и экспортируются в таблицы для проведения дальнейшего анализа токопотребления, потерь мощности и прочего.

Контактная сеть представлена в виде системы с распределенными параметрами и состоит из участков с удельными сопротивлениями, между которыми по команде блока Timer через

определенные интервалы времени, задаваемые в блоках Transport Delay, происходит переключение с помощью элементов Ideal Switch. Так моделируется передвижение электропоезда по рассматриваемому участку с регулируемой скоростью. Несмотря на глухое заземление рельсовых цепей, а также представление контактной сети в виде последовательных участков, их количество может быть таково, что погрешность расчетов становится незначительной [6].

На выбранном участке межподстанционной зоны включается конденсатор, моделирующий компенсирующее устройство, ток через который также фиксируется в каждый момент

времени и экспортируется в табличный вид [1, 8–11].

Электротяговая нагрузка может быть смоделирована в простейшей форме путем последовательного включения активного и реактивного сопротивления между рельсом и контактной сетью либо задана в виде источника тока постоянного действующего значения. Однако для более детального моделирования целесообразно использовать два параллельно включенных источника тока (активного и индуктивного) со свободно задаваемым графиком токопотребления нагрузки с помощью элемента Signal Builder. Пример формирования кривой тока показан на рис. 3.

Независимое изображение различных по форме кривых активного и индуктивного тока позволяет моделировать изменение коэффициента мощности в соответствии с характеристиками токопотребления электропоезда на заданном участке. То есть при наличии достоверных данных по токопотреблению на заданном участке моделирование электротяговой нагрузки является достаточно точным даже с учетом того, что в действительности ток электропоезда не меняется скачком, как показано на рис. 3 [7].

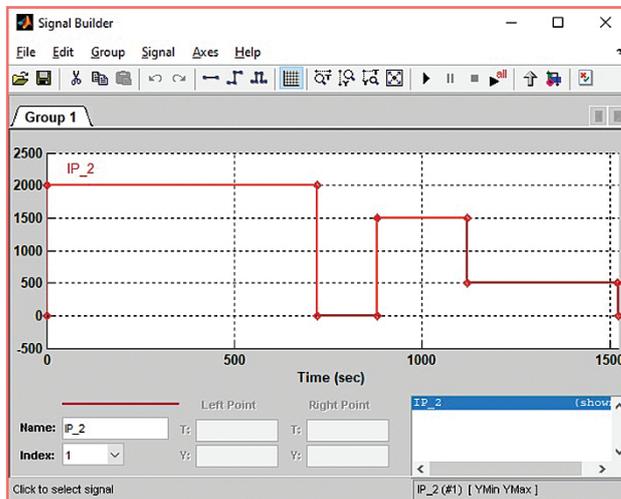


Рис. 3. График потребления активного или реактивного тока

Выводы

В отличие от специализированных пакетов программ, предназначенных для моделирования систем электроснабжения, программная среда MATLAB-Simulink позволяет свободно создавать модели любых энергетических систем, что зачастую является необходимой частью проводимых исследований с использованием компьютерного моделирования.

Стоит заметить, что при конкретных значениях сопротивлений энергосистемы, взятых с реальных объектов, при отсутствии нагрузки и отключенном компенсирующем устройстве в тяговой сети наблюдается протекание значительных по величине транзитных токов, что влечет за собой дополнительные потери мощности.

В любых узлах тяговой сети, где это необходимо, могут быть установлены соответствующие измерители, показания которых формируются в табличном виде и могут быть экспортированы для дальнейшего анализа.

Предложенная модель системы тягового электроснабжения обладает рядом преимуществ, крайне важных при решении исследовательских задач, таких как свободное конфигурирование любых элементов тяговой сети и системы внешнего электроснабжения, возможность непосредственного наблюдения за процессами, происходящими в различных узлах рассматриваемой сети, неограниченное проведение измерений необходимых параметров и иных, чего не позволяет программный комплекс КОРТЭС.

Литература

1. Агунов А.В. Анализ потерь мощности в контактной сети при поперечной емкости компенсации с учетом перемещения поездов по межподстанционной зоне / А.В. Агунов, Д.А. Соколов // Тез. докл. 9-го Междунар. симпозиума ELTRANS2017.– СПб.: ПГУПС, 2017.– С. 10.
 2. Агунов А.В. Анализ рабочих характеристик элементов и устройств автоматики систем обеспечения движения поездов с помощью компьютерного моделирования / А.В. Агунов, Д.А. Соколов // Бюл. результатов науч. исследований.– СПб.: ПГУПС, 2018, вып. 1.– С. 87–93.
 3. Агунов А.В. Компьютерное моделирование и анализ работы устройств автоматики систем электроснабжения железных дорог / А.В. Агунов, Д.А. Соколов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения.– СПб.: ПГУПС, 2018, вып. 1.– С. 136–140.
 4. Агунов А.В. Компьютерное моделирование систем электроснабжения / А.В. Агунов, А.Н. Марикин, Д.А. Соколов // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса.– СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018.– С. 14–15.
 5. Агунов А.В. Применение компьютерного моделирования при анализе работы устройств автома-
- тики в системах тягового электроснабжения / А.В. Агунов, Д.А. Соколов // Перспективы будущего в образовательном процессе: сборник тезисов Национальной научно-технической конференции.– СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018.– С. 22–23.
6. Кузин С.Е. Методы расчета системы электроснабжения электрических железных дорог / С.Е. Кузин. – Л.: Изд-во ЛИИЖТ, 1970.– 96 с.
 7. Лебедев А.Б. Основы электрической тяги / А.Б. Лебедев. – Л.; М.: ОНТИ. Гл. ред. энергетич. лит., 1937. – 620 с.
 8. Соколов Д.А. Анализ потерь мощности в контактной сети при поперечной емкости компенсации с учетом перемещения поездов по межподстанционной зоне / Д.А. Соколов, А.В. Агунов // Бюл. результатов науч. исследований.– СПб.: ПГУПС, 2017, вып. 4(25).– С. 199–207.
 9. Соколов Д.А. Выбор устройств поперечной емкости компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока / Д.А. Соколов, А.В. Агунов // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием.– Омск: ОмГУПС, 2018.– С. 229–235.
 10. Соколов Д.А. Потери мощности в контактной сети с учетом перемещения поездов по межподстанционной зоне при поперечной емкости компенсации / Д.А. Соколов, В.М. Варенцов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. трудов LXXVII Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.– СПб.: ПГУПС, 2017.– С. 394–399.
 11. Соколов Д.А. Потери мощности в проводах контактной сети железных дорог переменного тока при установке компенсирующего устройства в середине межподстанционной зоны с учетом движения по ней поездов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения.– СПб.: ПГУПС, 2017, т. 13, вып. 3(52).– С. 79–88.

Агунов Александр Викторович

Родился в 1967 году. В 1991 году окончил Кишиневский политехнический институт по специальности «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры». Доктор технических наук, профессор. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Методология и принципы построения систем управления параметрами качества электроэнергетики в судовых электроэнергетических системах с нелинейными элементами». Опыт работы – 30 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС. Имеет 115 печатных трудов, в том числе 15 патентов на изобретения.

Марикин Александр Николаевич

Родился в 1952 году. В 1975 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодоро-

жного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Доктор технических наук, доцент. В 2008 году защитил диссертацию по теме «Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока». Опыт работы – 34 года. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС. Имеет более 50 научных трудов, более 5 патентов на изобретения.

Соколов Денис Алексеевич

Родился в 1995 году. В 2017 году окончил ПГУПС по специальности «Электроснабжение железных дорог». Опыт работы – 2 года. В настоящее время работает главным специалистом группы РЗА Дорожной электротехнической лаборатории Октябрьской дирекции по энергообеспечению «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД». Имеет 16 научных трудов.

Agunov Alexander

Was born in 1967. In 1991 he graduated from Kishinev Polytechnic Institute with a degree in «Design and manufacturing of electronic-computer equipment». Doctor of engineering sciences, professor. In 2004 he defended his thesis on the topic «Methodology and design concepts of control systems of electrical power quality parameters in shipboard electric power systems with nonlinear elements». Work experience is 30 years. At present he works as a professor at the Department of power supply of railways of PGUPS. He has 115 printed works, including 15 patents for inventions.

Marikin Alexander

Was born in 1952. In 1975 he graduated from Leningrad Institute of Railway Engineers with a degree in «Electrification of railway transport». Doctor of engineering sciences, associate professor. In 2008 he defended his thesis on the topic «Voltage compensation at current collectors of electrified railway equipment of direct current». Work experience is 34 years. At present he works as a chairman at the Department of power supply of railways of PGUPS. He has more than 50 scientific papers, more than 5 patents for inventions.

Sokolov Denis

Was born in 1995. In 2017 he graduated from PGUPS with a degree in «Power supply of railways». Work experience is 2 years. At present he works as a chief specialist of relay protection and automatic equipment group of Railway electric laboratory of Oktyabrskiy board of directors in power supply of «Transenergo» – branch office of JSCo «RZD». He has 16 scientific papers.

Электрические измерения динамических процессов при ходовых испытаниях грузовых вагонов

// Electrical measurements of dynamic processes in running trials of freights //

Третьяков А. В., д.т.н., профессор, Бурков А. Т., д.т.н., профессор,
Мазнев А. С., д.т.н., профессор, Марков К. В.,
ПГУПС, Санкт-Петербург
Зимакова М. В., к.т.н., Петров А. А.,
АО «НВЦ «Вагоны», Санкт-Петербург

В данной статье рассмотрен новый подход к проведению ходовых динамических испытаний грузовых вагонов с использованием методов электроизмерений – метода тензометрии. Обосновано предложение о проведении испытаний с помощью тензометрической колесной пары с использованием беспроводной системы передачи информации по Wi-Fi. Описываются характерные особенности внедрения тензометрической колесной пары в процесс проведения ходовых динамических испытаний. Значительное внимание уделяется апробации данного метода проведения испытаний.
Ключевые слова: электротензометрия, передача информации по Wi-Fi, ходовые испытания, грузовой вагон, тензометрическая колесная пара, синхронизация динамических процессов.

The present article describes a new approach to holding of running dynamic testing of freight wagon using electrical measurement methods – strain measurement method. Suggestions about test operation with the use of strain-measuring mounted wheels using the wireless information transfer system via Wi-Fi is justified. Characteristic features of intercalation of strain-measuring mounted wheels in the course of performance of cruising dynamic testings are described. Significant attention is paid to the approval of this testing method.

Keywords: electrotensometry, information transfer via Wi-Fi, running trails, freight, strain-measuring mounted wheels, sync of dynamic processes.

В настоящее время в России происходит активное внедрение инновационных грузовых вагонов, представляющих собой сложную статически неопределимую конструкцию, на которую действуют разнообразные эксплуатационные нагрузки, носящие случайный статистический характер [1].

В процессе создания новых конструкций вагонов обязательным этапом работы является проведение ходовых динамико-прочностных, тормозных, по воздействию на железнодорожный путь и ряда других испытаний, подтверждающих результаты теоретических исследований с применением методов математического моделирования, в том числе метода конечных элементов.

Основой этих испытаний являются измерения различных по своей физической природе процессов, протекающих в рассматриваемых механических системах. Дуальность механических и электрических процессов позволяет использовать для измерений величин практически любых механических процессов (усилий, деформаций, ускорений и т.д.) легко регистрируемые электрические процессы (напряжение, сила тока). Такой подход позволяет существенно упростить процедуру регистрации динамических процессов, возникающих при испытаниях грузовых вагонов.

При проведении испытаний с использованием методов тензометрии регистрируются деформации в различных узлах вагона, позволяющие получить информацию о напряженном деформированном состоянии детали и конструкции в целом [2–5].

Принцип действия тензорезисторов заключается в изменении удельного сопротивления материала, из которого состоит чувствительный элемент, под действием растягивающих или сжимающих деформаций, названный тензорезистивным эффектом [2–5].

Известно, что величина электрического сопротивления проводника определяется по формуле:

$$R = \rho * \frac{l}{F}, \quad (1)$$

где R – электрическое сопротивление, Ом;
 ρ – удельное сопротивление, Ом*мм²/м;
 l – длина провода, м;
 F – площадь поперечного сечения, мм².

На этом основании можно утверждать, что:

$$R = f(l, F, \rho),$$

а если принять, что $\frac{d\rho}{\rho}$ – относительное изменение удельного сопротивления, $\frac{dl}{l}$ – относительное изменение длины, $\frac{dF}{F}$ – относительное изменение площади поперечного сечения, то относительное изменение сопротивления R проводника определяется путем дифференцирования уравнения (1):

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dF}{F}. \quad (2)$$

Величину $\frac{dl}{l}$ в механике принято называть относительной деформацией и обозначать буквой ϵ .

Было установлено наличие линейной зависимости между относительной деформацией и относительным изменением удельного сопротивления:

$$\frac{d\rho}{\rho} = m * \epsilon, \quad (3)$$

где m – коэффициент изменения удельного сопротивления.

Величина $\frac{dF}{F}$ при удлинении тензочувствительного провода имеет отрицательный знак и для провода с круглым сечением может быть выражена следующей зависимостью:

$$\frac{dF}{F} = -\frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = -\frac{2dr}{r},$$

где r – радиус тензочувствительного провода.

Если учесть, что коэффициент Пуассона

выражается как $\mu = \frac{\frac{dr}{r}}{\epsilon}$, то

$$\frac{dF}{F} = -2\mu\epsilon, \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Учитывая, что $\frac{dl}{l} = \epsilon$, и, подставив уравнения (3) и (4) в уравнение (2), получим:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu + m) * \epsilon.$$

Обозначив $S = (1 + 2\mu + m)$ получим основное уравнение тензорезистивного эффекта:

$$\frac{dR}{R} = S * \epsilon$$

или, переходя к конечным величинам:

$$\frac{\Delta R}{R} = S * \epsilon, \quad (5)$$

где R – сопротивление недеформированной проволоки;

ΔR – абсолютное приращение сопротивления деформированной проволоки;

S – коэффициент тензочувствительности;

ϵ – относительная деформация тензочувствительной проволоки.

Одним из основных видов испытаний, где экспериментально проверяется спроектированная и изготовленная конструкция вагона и применяются принципы электротензометрии, являются испытания на оценку динамических качеств и воздействия подвижного состава на железнодорожный путь.

Согласно ПНСТ 190–2017 для проведения ходовых динамических и по воздействию подвижного состава на железнодорожный путь испытаний можно использовать тензометрическую колесную пару (далее – ТКП) [6].

Работа по проектированию, созданию и внедрению тензометрической колесной пары в эксплуатацию включала в себя несколько этапов.

На начальном этапе сотрудниками Санкт-Петербургского политехнического университета, а именно ассистентом кафедры «Компьютерные технологии в машиностроении» К. В. Елисеевым был разработан ряд конечно-элементных моделей колесной пары [7, 8, 9]. Эти модели при различных видах нагружения показаны на рис. 1.

Цель этой части работы заключалась в выборе рациональных мест установки

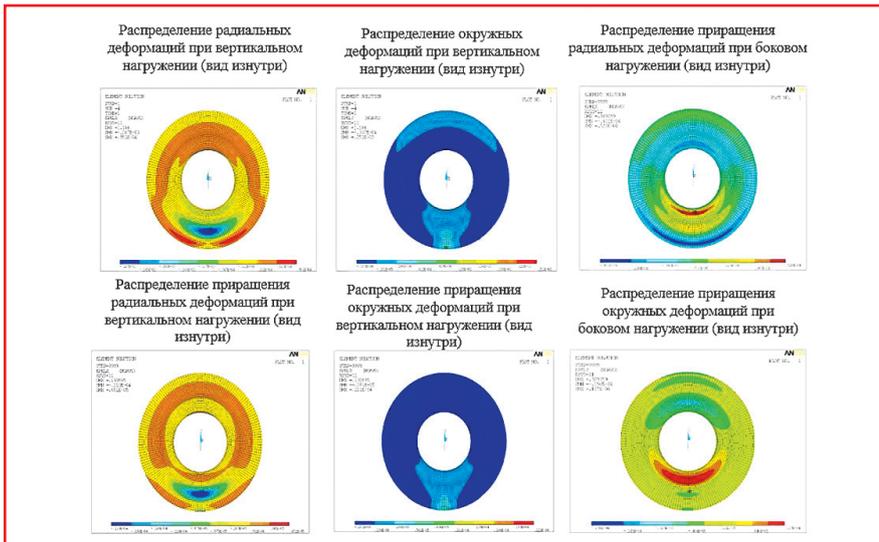


Рис. 1. Конечно-элементные модели диска колесной пары при различных видах нагружения

тензорезисторов на внутреннюю сторону дисков колес колесной пары. Критерием выбора являлось определение мест, где приращение деформаций максимально при приложенной вертикальной и боковой силе.

На основании выполненных расчетов было установлено, что такими местами являются две концентрические окружности диаметрами 398,2 и 586,6 мм, расположенные на внутренней стороне дисков колес колесной пары (рис. 2).

Был разработан математический аппарат, позволяющий восстанавливать усилия в пятне контакта колеса-рельса по зарегистрированным деформациям

$$\Delta E = Z \Delta P \quad (6)$$

$$Z = \frac{\partial E}{\partial P} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial E_1}{\partial P_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial E_n}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial E_n}{\partial P_m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Delta P = (Z^T Z)^{-1} Z^T \Delta E \quad (8)$$

$$B = (Z^T Z)^{-1} Z^T \quad (9)$$

$$\Delta P = B \Delta E. \quad (10)$$

В формуле 6 показана связь между приращением деформаций (E) и приращением приложенных нагрузок (P) с помощью

матрицы Якоби (Z) (формула 7), получаемой на стенде измерений масштабов измерения тензометрических схем. Поскольку число уравнений n больше числа неизвестных m, система не имеет точного решения. В этом случае находится так называемое псевдорешение, позволяющее минимизировать евклидову норму ошибки за счет вычисления приращения приложенных нагрузок (P) по формуле 8 с помощью псевдообратной матрицы, полученной по формуле 9 (B). Конечное уравнение для восстановления сил – формула 10.

На следующем этапе была разработана конструкторская документация и изготовлена ТКП, состоящая из (рис. 3) колесной пары типа РВ2Ш-957-Г, регистрирующей аппаратуры, изготовленной научно-производственным предприятием «Мера» (модель МИС-1100), позволяющей передавать информацию с вращающихся дисков колесной пары на станцию сбора данных по беспроводной сети Wi-Fi [10], тахо-датчика, основанного на эффекте Холла, позволяющего регистрировать и вычислять угловую скорость колесной пары, тензометрических схем, образующих 16 измерительных сечений с шагом 22,5 градуса (или около 19 см), расположенных на двух концентрических окружностях.

На данное устройство был получен патент на изобретение [11].

Для определения масштабов измерения тензометрических схем, расположенных на дисках ТКП, была разработана конструкторская документация и изготовлен стенд (рис. 4а), состоящий из [12, 13] металлоконструкции, измерительной системы, системы приложения нагрузок, состоящей из трех типов гидrocилиндров концентрических окружностей для создания вертикальной, боковой и продольной нагрузки.

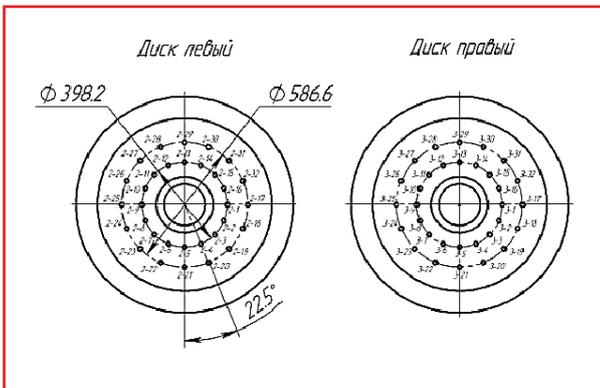


Рис. 2. Схема размещения тензорезисторов

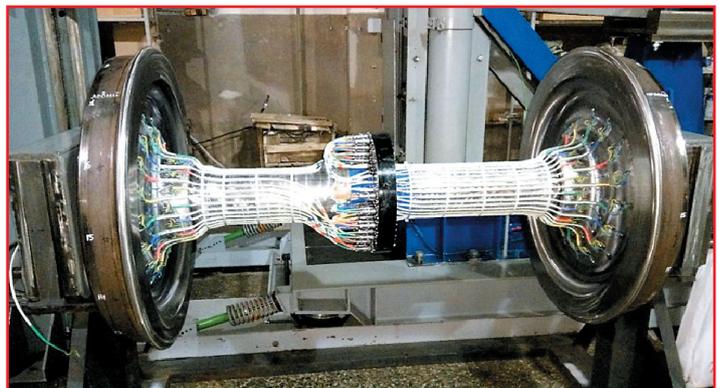


Рис. 3. Общий вид ТКП

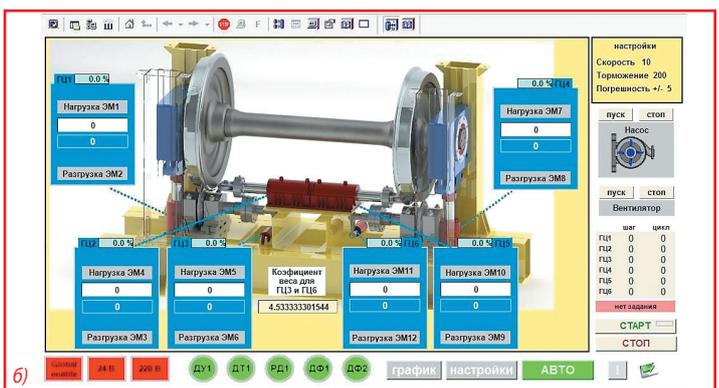
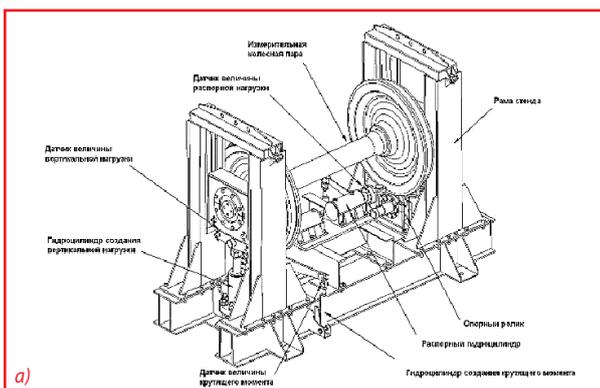


Рис. 4: а) схема стенда для определения масштабов измерения тензометрических схем; б) диалоговое окно аппаратно-программного комплекса

Стенд позволяет прикладывать вертикальные нагрузки в диапазоне от 0 до 400 кН, боковые – в диапазоне от 0 до 200 кН, изгибающий момент от 0 до 10 кН*м, дает возможность задания комбинации нагрузок и изменения положения пятна контакта в системе «колесо-рельс».

Управление стендом осуществляется с помощью созданного аппаратно-программного комплекса, позволяющего проводить процесс определения масштабов измерения в ручном и автоматическом режимах (рис. 4б).

Определение масштабов измерения тензометрических схем осуществлялось приложением к тензометрической колесной паре вертикальных и боковых нагрузок.

На рис. 5 представлено фото опирания колеса ТКП на опорный ролик во время приложения вертикальной нагрузки (а) и нагружение колеса распорным роликом при боковой нагрузке (б), а также характерные диаграммы ступенчатого нагружения-обезгрузки, зарегистрированные измерительной аппаратурой МС-1100.

Экспериментальная проверка работоспособности разработанного устройства осуществлялась на подъездных путях АО «ТВСЗ».

Для этого был сформирован опытный сцеп, состоящий из маневрового локомотива и полувагона, и проведена серия поездок на малых скоростях, не превышающих 20 км/ч, на прямом участке пути и кривой радиуса 250 м. В результате этой проверки была подтверждена работоспособность ТКП в реальных условиях эксплуатации, устойчивая и корректная работа тензометрических схем, наклеенных на диски колес ТКП, системы передачи зарегистрированных сигналов от роторных частей вагона (в данном случае дисков колес колесной пары) к статорным частям (роутер и станция сбора данных) по беспроводной сети Wi-Fi [14, 15].

Апробация данного метода проведения ходовых динамических и по воздействию подвижного состава на железнодорожный путь испытаний также проводилась в несколько этапов. Первый этап проводился на контрольных железнодорожных участках между станциями Смычка – Качканар Свердловской железной дороги.

Целью данной апробации являлось сравнение вертикальных и боковых силовых воздействий подвижного состава на железнодорожный путь тремя методами, а именно: ГОСТ Р 55050–2012 [16], «РЖД-2016», ТКП.

Задачей данной апробации являлась проверка на статистическую значимость результатов измерений этими тремя методами.

Для проведения испытаний был сформирован опытный поезд, состоящий из двух локомотивов, вагона-лаборатории и 37 полувагонов модели 12-9548-01 производства АО «ТВСЗ» на тележках модели 18-6863 с нагрузкой 27 тонн на ось.

По результатам испытаний были рассчитаны статистические характеристики, а именно средние значения, среднеквадратичное отклонение и максимально вероятные значения вертикальных и боковых сил, полученных с двух колес ТКП, для двух измерительных участков – кривой радиуса 625 м на скорости 80 км/ч и кривой радиуса 395 м на скорости 60 км/ч (рис. 7).

На основании данных, полученных тремя методами измерений, были построены гистограммы максимально вероятных значений вертикальных и боковых сил (рис. 8).

Максимально вероятные значения вертикальных сил, полученные с помощью ТКП, отличаются от значений, полученных с помощью метода «РЖД-2016», и ГОСТ Р 55050–2012 на 6%.

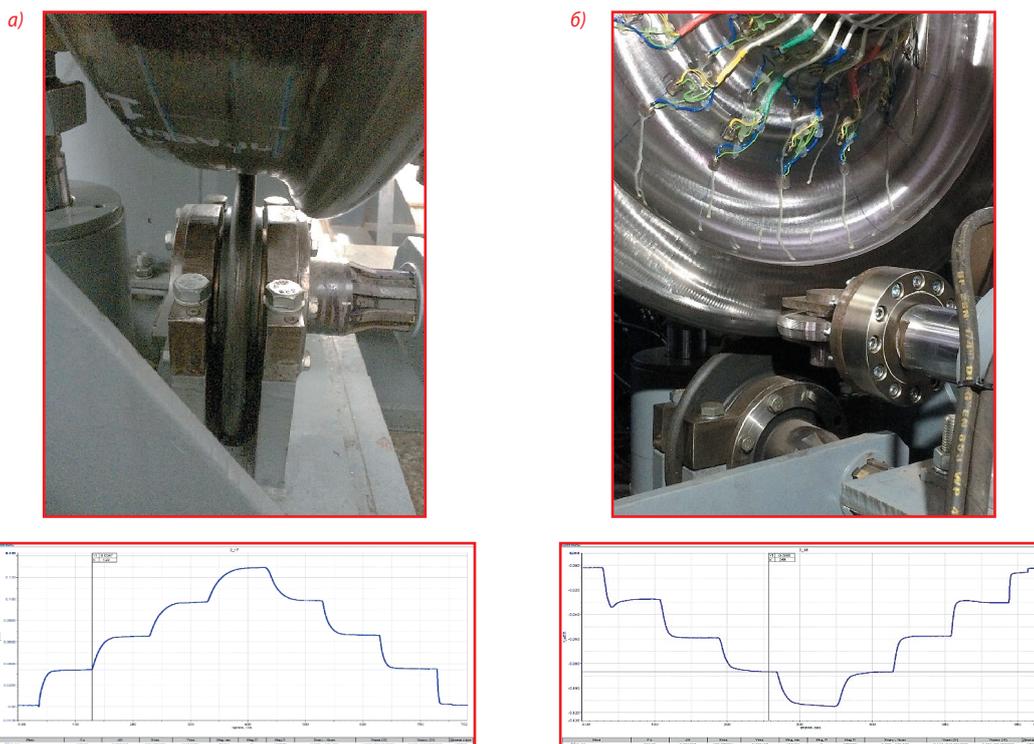


Рис. 5. Приложение нагрузок к ТКП в процессе определения масштабов измерения тензометрических схем: а) при вертикальном нагружении; б) при боковом нагружении



Рис. 6. Опытный сцеп: а) исследуемый полувагон модели 12–9548–01; б) установленная под исследуемый полувагон ТКП

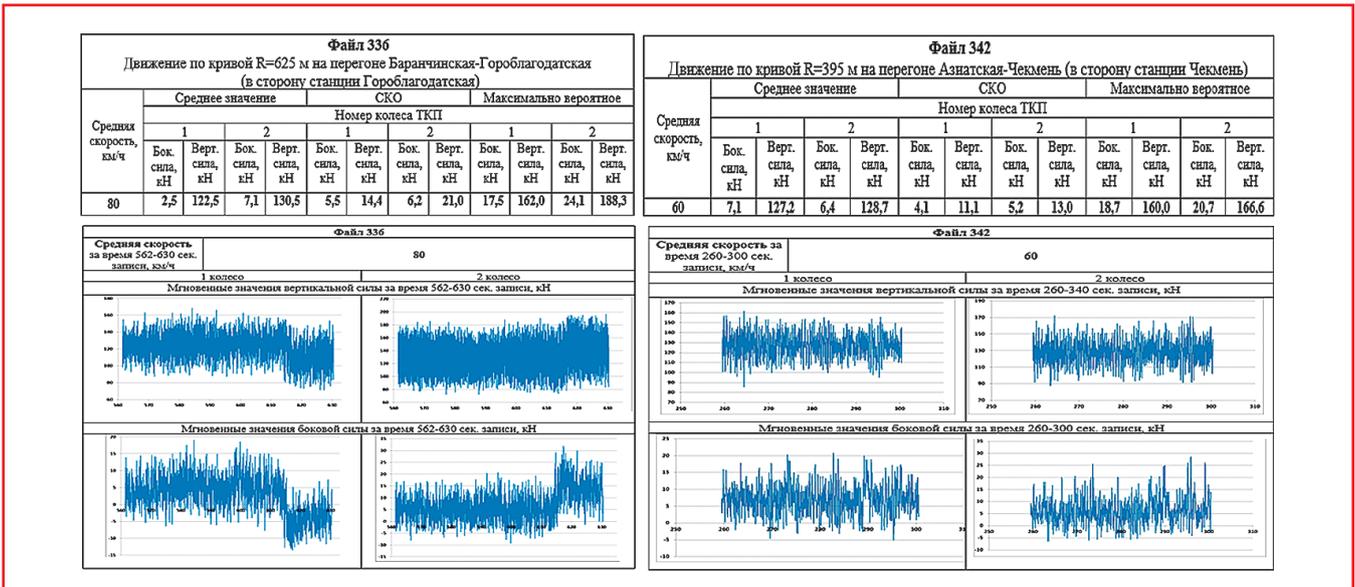


Рис. 7. Статистическое распределение значений вертикальных и боковых сил, полученных с применением ТКП

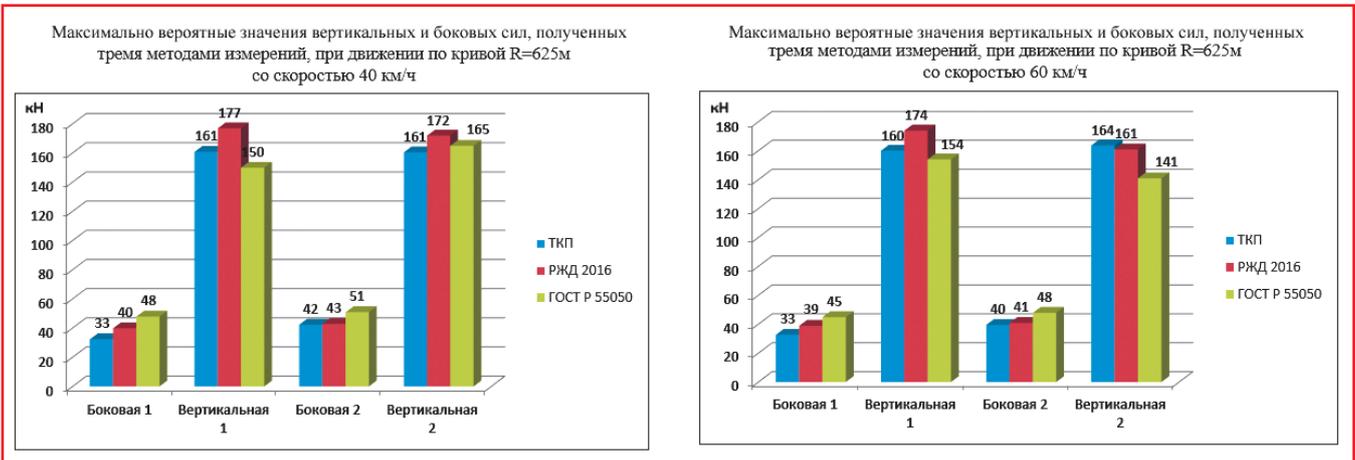


Рис. 8. Гистограмма максимально вероятных значений вертикальных и боковых сил, полученных тремя методами измерений

Проверка нулевой гипотезы о равенстве средних значений вертикальных сил, полученных с помощью ТКП и методом РЖД-2016

СКОРОСТЬ, км/ч	ОСЬ ВАГОНА	НОМЕР КОЛЕСА	СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ М ТКП, кН	СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ПО МЕТОДУ РЖД 2016, кН	НАБЛЮДАЕМОЕ ЗНАЧЕНИЕ КРИТЕРИЯ, $ Z_{набл} $	СООТВЕТСТВИЕ УСЛОВИЮ НУЛЕВОЙ ГИПОТЕЗЫ $ Z_{набл} < Z_{кр}^*$
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=625 м НА ПЕРЕГОНЕ БАРАНЧИНСКАЯ-ГОРОБЛАГОДАТСКАЯ						
40	НАБЕГ.	1	126	137	0,73	ДА
		2	129	132	0,21	ДА
40	НЕАБЕГ.	1	130	135	0,49	ДА
		2	126	133	0,67	ДА
60	НАБЕГ.	1	126	138	0,84	ДА
		2	129	128	0,07	ДА
	НЕАБЕГ.	1	128	137	0,60	ДА
		2	126	130	0,33	ДА
80	НЕАБЕГ.	1	131	134	0,16	ДА
		2	123	123	0,00	ДА
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=395 м НА ПЕРЕГОНЕ АЗИАТСКАЯ-ЧЕКМЕНЬ						
60	НЕАБЕГ.	1	129	124	0,45	ДА
		2	127	130	0,34	ДА
40	НАБЕГ.	1	126	128	0,16	ДА
		2	130	129	0,08	ДА
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=695 м НА ПЕРЕГОНЕ АЗИАТСКАЯ-ЧЕКМЕНЬ						
60	НЕАБЕГ.	1	127	133	0,30	ДА
		2	127	127	0,00	ДА
40	НАБЕГ.	1	127	146	1,20	ДА
		2	127	132	0,37	ДА

* - $Z_{кр} = 2,75$ ПРИ УРОВНЕ ЗНАЧИМОСТИ 0,004

Проверка нулевой гипотезы о равенстве средних значений вертикальных сил, полученных с помощью ТКП и методом по ГОСТ Р 55050-2012

СКОРОСТЬ, км/ч	ОСЬ ВАГОНА	НОМЕР КОЛЕСА	СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ М ТКП, кН	СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ПО МЕТОДУ ГОСТ Р, кН	НАБЛЮДАЕМОЕ ЗНАЧЕНИЕ КРИТЕРИЯ, $ Z_{набл} $	СООТВЕТСТВИЕ УСЛОВИЮ НУЛЕВОЙ ГИПОТЕЗЫ $ Z_{набл} < Z_{кр}^*$
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=625 м НА ПЕРЕГОНЕ БАРАНЧИНСКАЯ-ГОРОБЛАГОДАТСКАЯ						
40	НАБЕГ.	1	126	126	0,00	ДА
		2	129	125	0,28	ДА
40	НЕАБЕГ.	1	130	123	0,79	ДА
		2	126	126	0,00	ДА
60	НАБЕГ.	1	126	126	0,00	ДА
		2	129	117	1,03	ДА
	НЕАБЕГ.	1	128	127	0,07	ДА
		2	126	126	0,00	ДА
80	НЕАБЕГ.	1	131	124	0,42	ДА
		2	123	121	0,15	ДА
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=395 м НА ПЕРЕГОНЕ АЗИАТСКАЯ-ЧЕКМЕНЬ						
60	НЕАБЕГ.	1	129	119	0,08	ДА
		2	127	119	0,35	ДА
40	НАБЕГ.	1	126	158	0,16	ДА
		2	130	160	0,39	ДА
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=695 м НА ПЕРЕГОНЕ АЗИАТСКАЯ-ЧЕКМЕНЬ						
60	НЕАБЕГ.	1	127	138	0,00	ДА
		2	127	112	0,08	ДА
40	НАБЕГ.	1	127	156	0,08	ДА
		2	127	152	0,14	ДА

* - $Z_{кр} = 2,75$ ПРИ УРОВНЕ ЗНАЧИМОСТИ 0,004

Рис. 9. Проверка справедливости нулевой гипотезы о равенстве средних значений вертикальных сил, полученных тремя методами

Расхождение максимально вероятных значений боковых сил, полученных с помощью ТКП и по методу «РЖД-2016» составило 11%, а с ГОСТ Р 55050–2012 достигает 30%.

Сравнение средних значений вертикальных и боковых сил, полученных тремя методами, проводилось проверкой справедливости нулевой гипотезы – теории математической статистики о сходности двух независимых выборок (рис. 9).

Справедливость нулевой гипотезы доказывает, что различие выборочных средних вертикальных и боковых сил, зарегистрированных с помощью этих методов, не значимо и объясняется разным отбором объекта выборки:

- сопоставление средних значений вертикальных сил, полученных тремя методами, показало справедливость нулевой гипотезы. Это говорит о том, что они принадлежат одной и той же генеральной совокупности, и отличия вызваны случайным характером процесса;

- сопоставление боковых сил, полученных с помощью ТКП и методом «РЖД-2016», показало справедливость нулевой гипотезы. Это говорит о том, что они также принадлежат одной и той же генеральной совокупности, и отличия вызваны случайным характером процесса;

- сопоставление боковых сил, полученных с помощью ТКП и методом по ГОСТ Р 55050–2012, в ряде случаев опровергло справедливость нулевой гипотезы. Это говорит о том, что они принадлежат разным генеральным совокупностям, и между этими измерениями имеются существенные отличия, не связанные со случайным характером процесса (рис. 10).

При проведении экспериментов были выявлены два недостатка на этом этапе работы – не было четкой фиксации скоростей движения испытываемого вагона, и идентификация измерительных участков на железнодорожном пути являлась недостаточно точной.

Данные замечания были устранены на следующем этапе апробации при проведении испытаний на скоростном испытательном полигоне АО «ВНИИЖТ» между станциями Белореченская – Майкоп, на характерных участках: прямая, стрелочный перевод, кривая радиуса 350 и 650 м (рис. 11).

Для устранения замечаний был применен GPS-навигатор, который позволил точно определять скорость и местоположение испытываемого вагона на измерительных участках.

Целью данной апробации было сравнение динамических показателей по ГОСТ 33788–2016 и воздействия подвижного состава на железнодорожный путь по ГОСТ Р 55050–2012 с ПНСТ 190–2017 [7, 16, 17].

На языке программирования Си # был разработан программный комплекс, позволяющий обрабатывать данные, полученные при ходовых динамических и по воздействию на железнодорожный путь испытаниях, и представлять их в графическом виде.

На рис. 12а и 12б представлены значения вертикальных и боковых сил, полученных с помощью ТКП, и рассчитанные по ним коэффициенты запаса устойчивости от схода колеса с рельса на кривой радиуса 350 и 650 м для скоростей 80 и 120 км/ч соответственно.

Проверка нулевой гипотезы о равенстве средних значений боковых сил, полученных с помощью ТКП и методом по ГОСТ Р 55050-2012

СКОРОСТЬ, КМ/Ч	ОСЬ ВАГОНА	НОМЕР КОЛЕСА	СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ПО ИЗМЕРЕНИ ЯМ ТКП, КН	СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ПО ГОСТ Р 55050-2012, КН	НАБЛЮДАЕМОЕ ЗНАЧЕНИЕ КРИТЕРИЯ, $ Z_{набл} $	СООТВЕТВИЕ УСЛОВИЮ НУЛЕВОЙ ГИПОТЕЗЫ $ Z_{набл} < Z_{кр}$, ДА/НЕТ
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=625 М НА ПЕРЕГОНЕ БАРАНЧИНСКАЯ-ГОРЮБЛАГОДАТСКАЯ						
40	НАБЕГ.	1	10	19	1,04	ДА
		2	9	18	0,83	ДА
	НЕ НАБЕГ.	1	13	6	3,61	НЕТ
		2	5	7	0,44	ДА
60	НАБЕГ.	1	11	19	0,74	ДА
		2	11	18	0,67	ДА
	НЕ НАБЕГ.	1	5	7	1,00	ДА
		2	4	7	0,51	ДА
80	НЕ НАБЕГ.	1	7	8	1,35	ДА
		2	3	8	0,51	ДА
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=395 М НА ПЕРЕГОНЕ АЗИАТСКАЯ-ЧЕКМЕНЬ						
60	НЕ НАБЕГ.	1	6	10	0,81	ДА
		2	7	9	1,45	ДА
40	НАБЕГ.	1	27	45	1,11	ДА
		2	29	41	0,00	ДА
ДВИЖЕНИЕ ПО КРИВОЙ R=695 М НА ПЕРЕГОНЕ АЗИАТСКАЯ-ЧЕКМЕНЬ						
60	НЕ НАБЕГ.	1	6	11	0,69	ДА
		2	5	9	1,13	ДА
40	НАБЕГ.	1	13	26	0,75	ДА
		2	14	25	0,20	ДА

* - $Z_{кр} = 2,75$ ПРИ УРОВНЕ ЗНАЧИМОСТИ 0,004

Рис. 10. Проверка справедливости нулевой гипотезы о равенстве средних значений боковых сил, полученных с помощью ТКП и ГОСТ Р 55050–2012

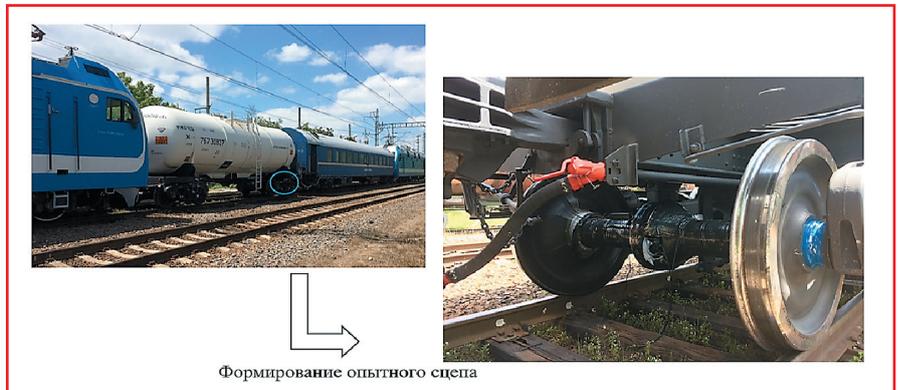


Рис. 11. Формирование опытного сцепа и установка под исследуемый вагон ТКП

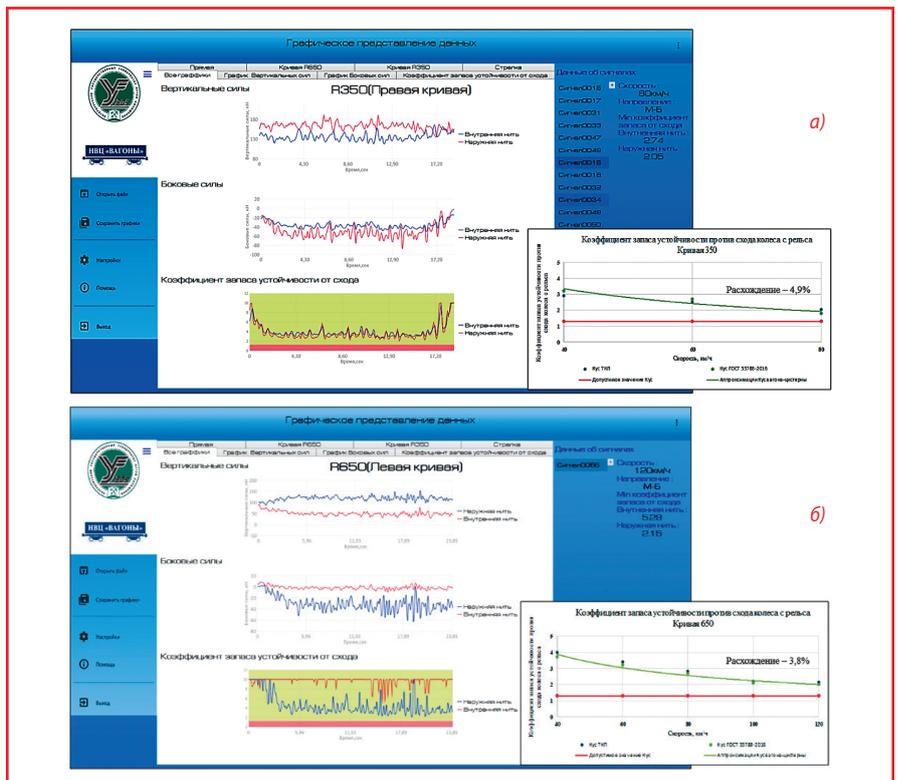


Рис. 12. Графическое представление данных, полученных с помощью ТКП

Литература

1. Анисимов П.С. Испытания вагонов / П.С. Анисимов. – М.: Маршрут, 2004. – С. 197.
2. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие / Р.А. Макаров, А.Б. Ренский, Г.Х. Боркунский, М.И. Ренский, науч. ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
3. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии / В.А. Шушкевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – 352 с.
4. Дайчик М.Л. Методы и средства натурной тензометрии: Справочник / М.Л. Дайчик, Н.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
5. Тензометрия в транспортном машиностроении / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев, С.А. Бехер, В.Л. Кожемякин, В.Д. Верескун, Е.Д. Псеровская. – Новосибирск: Наука, 2014. – 272 с.
6. Елисеев К.В., Исполов Ю.Г., Орлова А.М., Определение сил, возникающих при контакте колесной пары с рельсами / К.В. Елисеев, Ю.Г. Исполов, А.М. Орлова // Научно-технические ведомости, СПбГПУ, 2013, № 4–1(183). – С. 262–270.
7. ПНСТ Вагоны грузовые. Метод комплексных динамических и по воздействию на железнодорожный путь испытаний с применением тензометрической колесной пары. – М.: ВНИЦГТТ, 2017.
8. Елисеев К.В. Современные методы определения сил в контакте колесной пары и рельсов / К.В. Елисеев // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 867–876.
9. Елисеев К.В. Определение сил в контакте колесной пары и рельсов в динамике. Численное моделирование / К.В. Елисеев, А.А. Петров // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 6-й международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 335–345.
10. MIC-1100 (Система ротационная измерительная-вычислительная). Руководство по эксплуа-

Существующий метод по ГОСТ Р 55050-2012			С использованием ТКП (ПНСТ 190-2017, Приложение А)		
I. Кривая R=350м, V=80 км/ч, направление Майкоп-Белореченская					
Ось	1	Ось	1	Ось	1
Максимальное значение, МПа	90	Максимальное значение, МПа	115	Максимальное значение, МПа	115
Среднее значение, МПа	65	Среднее значение, МПа	64	Среднее значение, МПа	64
Максимально вероятное значение, МПа	97	Максимально вероятное значение, МПа	125	Максимально вероятное значение, МПа	125
			↑ наружная нить (набегающая сторона)		
II. Прямая, V=120 км/ч, направление Майкоп-Белореченская					
Ось	1	Ось	1	Ось	1
Максимальное значение, МПа	49	Максимальное значение, МПа	36	Максимальное значение, МПа	36
Среднее значение, МПа	32	Среднее значение, МПа	28	Среднее значение, МПа	28
Максимально вероятное значение, МПа	53	Максимально вероятное значение, МПа	46	Максимально вероятное значение, МПа	46
			↑ Полусумма кромочных напряжений		
III. Стрелочный перевод, переводная кривая, V=40 км/ч, направление Майкоп-Белореченская					
Ось	1	Ось	1	Ось	1
Максимальное значение, МПа	179	Максимальное значение, МПа	211	Максимальное значение, МПа	211
Среднее значение, МПа	119	Среднее значение, МПа	110	Среднее значение, МПа	110
Максимально вероятное значение, МПа	184	Максимально вероятное значение, МПа	226	Максимально вероятное значение, МПа	226
			↑ Полусумма кромочных напряжений		

Рис. 13. Значения кромочных напряжений, полученных экспериментально по ГОСТ Р 55050–2012 и рассчитанных по ПНСТ 190–2017

На этих рисунках (справа внизу) приведено сравнение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса, рассчитанного по ГОСТ 33788–2016 и ПНСТ 190–2017.

В соответствии с приложением А ПНСТ 190–2017 расчетным путем были получены численные значения кромочных напряжений на трех контрольных участках железнодорожного пути – кривой радиуса 350 м, прямой и переводной кривой стрелочного перевода.

Расхождение кромочных напряжений, полученных экспериментально по ГОСТ Р 55050–2012, со значениями по ПНСТ 190–2017 составило: для

кривой 1,5%, переводной кривой стрелочного перевода – 7,5%, прямой – 12,5% (рис. 13).

Для более точного сравнения сил была реализована синхронизация данных, полученных с помощью ГОСТ Р 55050–2012 и ТКП. Сравнение статистических характеристик значений вертикальных сил на прямом участке пути представлено на рис. 14 [18].

На основании проделанной работы можно сделать вывод о возможности применения разработанного метода оценки динамических качеств и воздействия подвижного состава на железнодорожный путь с помощью ТКП.

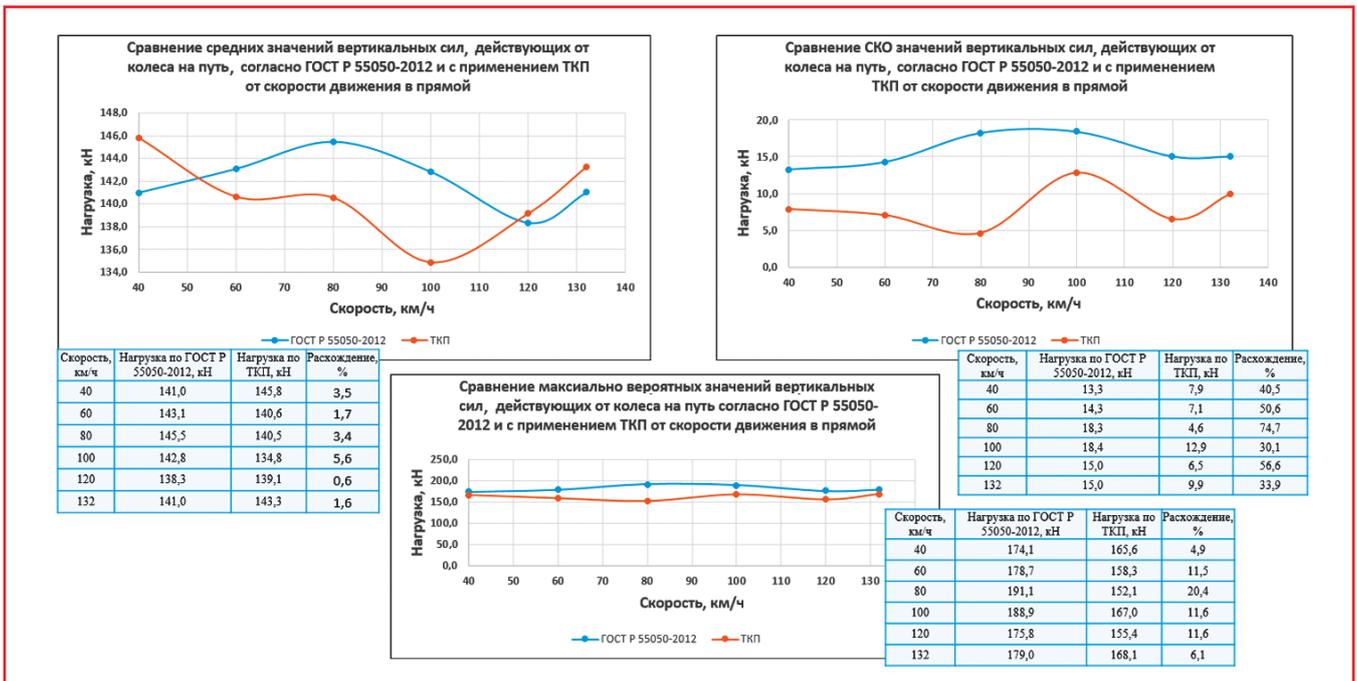


Рис. 14. Сравнение вертикальных сил, полученных по ГОСТ Р 55050–2012 и ТКП

талии. БЛИЖ.401250.1044.001 РЭ (РЭ). Мытищи. НПП «Мера», 2012. – С. 27.

11. Патент 2682567 Российская Федерация МПК G01L 1/22 G01L 5/16. Устройство сбора информации и способ оценки результатов взаимодействия между колесом и рельсом [Текст] / Третьяков А. В., Елисеев К. В., Зимакова М. В., Петров А. А., Козлов П. В.; заявитель и патентообладатель – Санкт-Петербург, акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны» (АО «НВЦ «Вагоны»), № 2017143085; заявл. 08.12.2017; опубл. 19.03.2019; бюл. № 8. – 10 с.

12. Елисеев К. В., Мигров А., Орлова А. М. Стенд градуировки измерительных колесных пар / К. В. Елисеев, А. А. Мигров, А. М. Орлова // Transport problems 2012. Selesian. Silesian University of Technology Faculty of Transport, 2012. – Pp. 474–479.

13. Мигров А. А., Дождиков А. В., Козлов М. Н., Потахов Д. А., Косоротов А. Н. Конструкция стенда для калибровки тензометрических колесных пар / А. А. Мигров, А. В. Дождиков, М. Н. Козлов, Д. А. Потахов, А. Н. Косоротов. – СПб.: ПГУПС, 2011. – С. 23–28, 323.

14. Третьяков А. В. Проведение ходовых динамических испытаний грузовых вагонов с применением тензометрической колесной пары / А. В. Третьяков, А. А. Петров, К. В. Елисеев, М. В. Зимакова // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2017, № 1. – С. 127–136.

15. Петров А. А. Сравнительный анализ результатов силового воздействия на железнодорожный путь с применением методов Шлюмпфа, «РЖД-2016» и «НВЦ-ТКП» / А. А. Петров, К. В. Елисеев, А. В. Третьяков, А. Н. Марикин, В. В. Никитин, М. В. Зимаков, П. В. Козлов // Бюллетень результатов научных исследований, 2017, № 4. – С. 58–64.

16. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: – М.: Стандартинформ, 2013. – 19 с.

17. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Введ. 2017–05–01. – М.: ВНИИЖТ, 2016. – 63 с.

18. Третьяков А. В. Синхронизация динамических процессов при ходовых динамических испытаниях / А. В. Третьяков, М. В. Зимакова, С. А. Курашов, А. А. Петров, О. А. Третьяков // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIV Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 9–13 июля 2019 г. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. – С. 99–102.

Третьяков Александр Владимирович

Родился в 1951 году. В 1974 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электронные вычислительные машины». Доктор технических наук, профессор. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации». Опыт работы – 45 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПС. Имеет 126 научных трудов, 10 патентов.

Бурков Анатолий Трофимович

Родился в 1933 году. В 1958 году окончил Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Доктор технических наук, профессор. Защитил докторскую диссертацию по теме «Управление электрорезервными процессами локомотивов с асинхронным приводом». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС. Имеет 146 научных трудов, 15 патентов и авторских свидетельств. Заслуженный работник высшей школы, награжден орденом Дружбы народов, орденом Почета.

Мазнев Александр Сергеевич

Родился в 1939 году. В 1961 году окончил Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта. Доктор технических наук, профессор. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Поиск эффективных технических решений тягового привода электрического подвижного состава с тиристорными преобразователями». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 300 научных трудов и патентов.

Марков Кирилл Викторович

Родился в 1994 году. В 2016 году окончил ПГУПС по специальности «Подвижной состав железных дорог». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает ассистентом на кафедре «Электрическая тяга» ПГУПС.

Зимакова Мария Викторовна

Родилась в 1987 году. В 2009 году окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Вагоны и вагонное хозяйство». Кандидат технических наук. В 2012 году защитила диссертацию по теме «Продление срока службы вагонов-цистерн с учётом изменения физико-механических свойств металлоконструкций базовых узлов». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает начальником отдела ходовых испытаний АО «НВЦ «Вагоны». Имеет 32 публикации, из них 6 публикаций, рекомендованных ВАК, 3 патента.

Петров Антон Анатольевич

Родился в 1992 году. В 2015 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Вагоны и вагонное хозяйство». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает инженером-испытателем II категории АО «НВЦ «Вагоны». Имеет 20 научных трудов, 1 патент.

Tretyakov Alexander

Was born in 1951. In 1974 he graduated from the Leningrad Institute of Railway Engineers with a degree in “Electronic computing machines”.

Doctor of technical sciences, professor. In 2004 he defended his thesis on the topic “Management of the individual resource of wagons in operation”. Work experience is 45 years. At present he is a professor at the Department of wagons and wagon facilities of PGUPS. He has 126 scientific papers, 10 patents.

Burkov Anatoliy

Was born in 1933. In 1958 he graduated from the Tomsk Electromechanical Institute of Railway Engineers with a degree in “Electrification of railway transport”. Doctor of technical sciences, professor. He defended his doctoral dissertation on the topic “Control of electric power processes of locomotives with asynchronous drive”. Work experience is more than 50 years. At present he works as a professor at the Department of power supply of railways of PGUPS. He has 146 scientific papers, 15 patents and copyright certificates. Honored worker of higher school, awarded the order of Friendship of peoples, the order of Honor.

Maznev Alexander

Was born in 1939. In 1961 he graduated from the Ural Electromechanical Institute of Railway Engineers. Doctor of technical sciences, professor. In 2004 he defended his thesis on the topic “Search for effective technical solutions for traction drive of electric rolling stock with thyristor converters”. Work experience is more than 50 years. At present he is a professor at the Department of electric traction of PSUPS. He has more than 300 scientific papers and patents.

Markov Kirill

Was born in 1994. In 2016 he graduated from the PGUPS with a degree in “Rolling stock of Railways”. Work experience is 3 years. At present he is a works as an assistant at the Department of electric traction of PSUPS.

Zimakova Maria

Was born in 1987. In 2009 she graduated from St. Petersburg State University of Railway Engineering with a degree in “Wagons and wagon facilities”. Candidate of technical sciences. In 2012 she defended her thesis on the topic “Extension of the service life of tank cars, taking into account changes in the physical and mechanical properties of the metal structures of base units”. Work experience is 10 years. At present she is the head of the running test department of JSC “NEC “Wagons”. She has 32 publications, including 6 publications recommended by the Higher Attestation Commission, 3 patents.

Petrov Anton

Was born in 1992. In 2015 he graduated from St. Petersburg State University of Railway Engineering with a degree in “Wagons and wagon facilities”. Work experience is 5 years. At present he is a test engineer of the second category of JSC “NEC “Wagons”. He has 20 scientific papers, 1 patent.

Сведения об авторах

Д.т.н., профессор
Ким Константин Константинович
+7-812-457-81-42

Д.т.н., доцент
Евстафьев Андрей Михайлович
+7-812-457-85-36

Д.т.н., профессор
Титова Тамила Семеновна
+7-812-436-98-88

Андреев Владимир Евгеньевич
+7-499-262-20-70

Д.э.н., профессор
Зайцев Анатолий Александрович
+7-812-457-82-45

Евстафьева Марина Валерьевна
+7-812-457-85-36

К.т.н., доцент
Шаряков Владимир Анатольевич
+7-812-579-65-90

К.т.н.
Лысов Николай Владимирович
+7-812-457-85-36

Д.т.н., доцент
Никитин Виктор Валерьевич
+7-812-457-85-96

К.т.н., доцент
Грачев Владимир Васильевич
+7-812-457-81-40

Д.т.н., профессор
Агунов Александр Викторович
+7-812-457-83-16

Д.т.н., профессор
Третьяков Александр Владимирович
+7-921-938-34-93

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 20%

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 e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2020 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.