

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:**  
В.А. Осипова

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

**Выпускающий редактор:**  
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.npptez.ru

**Подписано в печать:** \_\_.09.2021 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 2802

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

- Ким К. К., Панычев А. Ю., Ватаев А. С.**  
Модернизация магнитной системы выключателя ВАБ-209 . . . . . 2
- Валинский О. С., Евстафьев А. М., Никитин В. В.**  
К вопросу определения емкости накопителя энергии для тягового подвижного состава железных дорог . . . . . 8
- Марикин А. Н., Агунов А. В., Морозов С. В., Пугачев А. А.**  
Моделирование режима одностороннего включения линии электропередач 750 кВ на холостой ход . . . . . 12
- Пудовиков О. Е., Гречишников В. А., Бурков А. Т.**  
Методика выбора параметров системы автоматического управления скоростью движения тяжеловесного грузового поезда . . . . . 16
- Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Макарова Е. И., Марков К. В.**  
Использование кинетического накопителя электрической энергии в системе автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава . . . . . 20
- Титова Т. С., Терёхин И. А., Володин А. А., Баранов И. А.**  
Компьютерное моделирование емкости компенсации реактивной мощности в тяговой сети . . . . . 23

### МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Мазнев А. С., Викулов И. П., Волов А. В., Теличенко С. А.**  
Повышение эффективности рекуперативного торможения электропоездов метрополитенов . . . . . 28
- Зарифьян А. А., Киселев И. Г., Третьяков А. В., Обухов М. Ю.**  
Об основных направлениях развития экологически чистого тягового подвижного состава . . . . . 32
- Изварин М. Ю., Волов А. В., Рязанов Ю. В.**  
Полупроводниковые системы регулирования возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением . . . 36
- Викулов И. П., Сычугов А. Н., Андреев В. Е.**  
Исследование алгоритмов защиты от юза и боксования тягового подвижного состава . . . . . 41
- Курилкин Д. Н., Шрайбер М. А., Романова А. А.**  
Моделирование механических напряжений в обмотках тяговых электродвигателей тепловозов . . . . . 46

### Сведения об авторах

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

**Валинский Олег Сергеевич**  
+7-499-262-10-78

**Д.т.н., доцент**  
**Марикин Александр Николаевич**  
+7-812-457-83-16

**Д.т.н., доцент**  
**Пудовиков Олег Евгеньевич**  
+7-916-182-78-24

**К.т.н., доцент**  
**Шаряков Владимир Анатольевич**  
+7-905-227-33-02

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

**Д.т.н., профессор**  
**Мазнев Александр Сергеевич**  
+7-812-436-98-93

**К.т.н.**  
**Зарифьян Александр Александрович**  
+7-904-347-94-83

**К.т.н., доцент**  
**Изварин Михаил Юльевич**  
+7-812-457-85-36

**К.т.н.**  
**Викулов Илья Павлович**  
+7-812-457-85-36

**К.т.н., доцент**  
**Курилкин Дмитрий Николаевич**  
+7-812-457-81-40

# Модернизация магнитной системы выключателя ВАБ-209

// Modernization of the magnetic switch system VAB-209 //

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

В статье описывается разработка обоснованных предложений по модернизации магнитной системы выключателя ВАБ-209 и рекомендации для конструирования аналогичных систем. Моделирование стационарных и динамических режимов магнитного поля в магнитопроводе выполнялось с помощью пакета COMSOL MULTIPHYSICS 3.5. Показывается, что наличие размагничивающего витка около регулировочного отверстия обуславливает замедление приближения нормальной (по отношению к поверхности зазора) составляющей индукции в зазоре к значению, соответствующему моменту расхождения якоря от ярма, и замедление действия магнитного поля шины. Размагничивающий виток может оказаться полезным для предотвращения залипания якоря при быстрых нарастаниях индукции обратной полярности в зазоре при больших токах короткого замыкания. Задержка во времени между моментом, когда ток шины достигнет тока уставки выключателя, и моментом расхождения якоря и ярма в динамическом режиме в первую очередь определяется эквивалентной проводимостью стали сердечника, зависящей от свойств его материала и технологии изготовления сердечника, и практически не зависит от толщины постоянного магнита. Существенную задержку по времени вносит изготовление регулировочного стержня из сплошного металла. Для снижения времени отключения необходимо улучшить изоляцию пластин магнитопровода между собой, а также относительно металлических крепежных деталей.

**Ключевые слова:** выключатель, ток срабатывания, постоянный магнит, магнитопровод, якорь, уставка, магнитный поток.

На тяговых подстанциях городского электротранспорта для защиты силовых цепей и электрооборудования от токов короткого замыкания и токовых перегрузок используют автоматические

The article describes the development of reasonable proposals for modernizing the magnetic system of the VAB-209 switch and the recommendations to design the similar systems. We have made the simulation of stationary and dynamic modes of the magnetic field in the magnetic circuit with the help COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 package. It is shown that the presence of a demagnetizing loop near the control hole causes a slowdown in the approach of the normal (relative to the gap surface) component of the induction in the gap to the value corresponding to the moment of the armature drop off the yoke and a slowdown in the action of the magnetic field of the bus. The demagnetizing loop may be useful to prevent the armature from sticking at the rapid increases of the reverse polarity induction in the gap at the high short-circuit currents. The time delay between the moment when the bus current reaches the switch setpoint current and the moment of the armature drop off from yoke in the dynamic mode is primarily determined by the equivalent conductivity of the core steel depending on the properties of its material and the core manufacturing technology. This time delay practically does not depend on the thickness of the permanent magnet. The production of the control rod made of solid metal causes the significant time delay. We should improve the insulation of the magnetic circuit plates among themselves and also regarding metal fasteners to reduce the shutdown time.

**Keywords:** switch, actuation current, permanent magnet, magnetic circuit, armature, setpoint, magnetic flux.

быстродействующие выключатели серии ВАБ-209 [1–5].

Целью исследований являлась разработка обоснованных предложений по модернизации магнитной системы выключателя

ВАБ-209 для повышения скорости его срабатывания во время автоматического отключения тока короткого замыкания.

Магнитная система привода выключателя приведена на рис. 1.

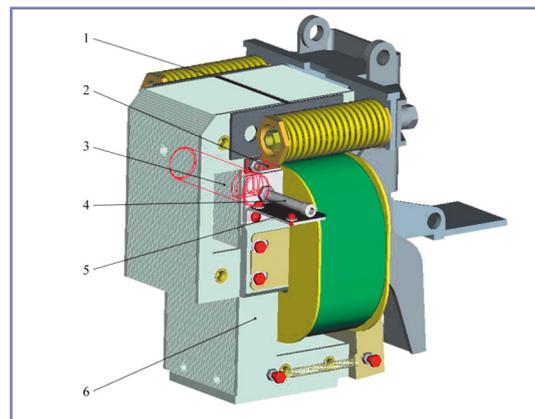


Рис. 1. Общий вид магнитной системы выключателя: 1 – постоянный магнит; 2 – размагничивающий виток, охватывающий часть магнитопровода; 3 – стальной стержень; 4 – болт, с помощью которого в отверстие в магнитопроводе вводится стальной стержень, изменяющий магнитное сопротивление; 5 – шкала уставки тока отключения; 6 – магнитопровод

Включение выключателя осуществляется подачей тока в обмотку катушки, расположенной на среднем стержне магнитопровода. Удержание контактов во включенном состоянии происходит за счет постоянного магнита, встроенного в магнитопровод. Отключение выполняется подачей на катушку тока обратной полярности или автоматически (при превышении тока нагрузки заданной уставкой отключения). Для этого в магнитопроводе имеется прямоугольное отверстие, в которое пропущена шина тока нагрузки выключателя. Магнитный поток тока шины направлен навстречу потоку постоянного магнита. При превышении тока уставки суммарный магнитный поток магнита и шины становится недостаточным для удержания якоря, скрепленного с подвижным контактом силовой цепи, и под действием пружины, противодействующей силе магнита, происходит отпадение якоря от ярма магнитопровода с последующим расхождением силовых контактов выключателя.

Для изменения уставки тока отключения в магнитопроводе на пути магнитного потока шины имеется регулировочное отверстие, увеличивающее магнитное сопротивление потоку шины. В случае необходимости изменить уставку, стальной стержень вводится в отверстие, в результате чего изменяется магнитное сопротивление. В дальнейшем используются следующие обозначения:

«Full» (регулируемое отверстие полностью заполнено сталью), «Half» (отверстие заполнено наполовину) и «Empty» (отверстие заполнено воздухом).

Размагничивающий виток, охватывающий часть пути магнитного потока, предназначен увеличить магнитное сопротивление таким образом, чтобы ускорить срабатывание выключателя при быстром нарастании тока короткого замыкания.

Магнитопровод стандартного выключателя выполнен из стали Ст-Э41 с толщиной листа, равной 0,5 мм.

Выключатель отключается, когда значение магнитной индукции начинает превышать  $B_{отп}$ , в результате электромагнитный момент якоря относительно оси поворота становится меньше момента отпадания  $M_{отп} = 2900 \text{ Н/м}$ .

Выключатель должен удовлетворительно функционировать как при медленном (квазистационарный режим), так и при быстром (динамический режим) нарастании тока нагрузки. При этом необходимо учитывать нелинейные характеристики стали и потери в стали, обусловленные ее перемагничиванием и вихревыми токами, вызванными изменением магнитного потока при росте тока нагрузки, а также части магнитного потока, замыкающейся по воздуху [6–10].

### Компьютерное моделирование квазистационарного режима

Вначале была собрана геометрическая модель сердечника (рис. 2). Серия расчетов позволила определить магнитную индукцию в воздушных зазорах между подвижным якорем и остальной частью магнитопровода при различных значениях тока силовой шины и разных уставках тока отключения.

На рис. 3 показана картина магнитного поля, созданного постоянным магнитом в отсутствие тока в медной шине ( $I = 0$ ). Магнитная проницаемость сердечника находилась из кривой намагничивания стали

Э-41, удельная электропроводность стали сердечника  $\sigma = 1,12 \times 10^3 \text{ См/м}$ , а для шины –  $\sigma = 5,57 \times 10^7 \text{ См/м}$ , намагниченность магнита  $M = -800000$ , его толщина  $h_{\text{магн}} = 6 \text{ мм}$ , диаметр регулируемого отверстия – 22 мм, режим «Full».

Видно, что при отсутствии тока шины магнитный поток магнита замыкается в основном по стали магнитопровода, причем приближение к насыщению ( $B = 2 \text{ Тл}$ ) наблюдается только в стали якоря. Индукция в середине длины зазора равна  $B = 0,88 \text{ Тл}$ , что соответствует силе притяжения якоря  $f = 970 \text{ Н}$  и электромагнитному моменту  $M = 8820 \text{ Н/м}$ .

Далее выполнялся расчет значений индукции  $B$  в зазоре при разных значениях тока шины  $I = J \times S_{\text{ш}}$ , где  $S_{\text{ш}}$  – площадь сечения медной шины,  $J$  – плотность тока шины. По результатам строились зависимости  $B(I)$ , по которым находились токи  $I$ , соответствующие значениям индукции  $B_{отп}$ .

Оказалось, что уже при токе  $I = 2 \text{ кА}$  имеет место сильное насыщение стали сердечника ( $B > 10 \text{ Тл}$ ) в окрестности шины. Причем правый воздушный зазор имеет индукцию приблизительно на 15% выше по сравнению с левым, что связано с меньшей площадью соприкосновения ярма с якорем в правом зазоре. Согласно формуле:  $B = (f \times 2\mu_0 / S)^{0,5}$ , где  $f$  – сила притяжения якоря, действующая в данном зазоре,  $S$  – площадь его поверхности,  $f$  в правом зазоре будет больше, чем в левом. Плечо этой силы составляет 20% от плеча силы левого зазора. Добавка к электромагнитному моменту силы левого плеча составит при этом 23%. Следовательно, величина индукции в левом зазоре  $B_{отп}$ , соответствующая отпаданию якоря, может быть принята на 10% меньше, чем по расчетам, учитывающим только силу, действующую в левом зазоре.

Результаты расчетов зависимости индукции в зазоре от тока шины представлены на рис. 4. На рис. 5 представлены графики зависимости индукции  $B$  в зазоре от тока шины при измененной толщине постоянного

магнита  $h_{\text{магн}} = 3 \text{ мм}$  и  $h_{\text{магн}} = 12 \text{ мм}$  в различных режимах уставки тока срабатывания. Эти графики показывают, что расчетная индукция в зазоре достигает значения отпадания якоря при токе 8,3 кА (режим «Full»), 7,5 кА (режим «Half») и 6 кА (режим «Empty»). Видно, что при большой скорости роста тока возможен отказ в работе выключателя, поскольку токи более 23 кА создают усилие в зазоре, блокирующее отпадание якоря. С уменьшением толщины магнита эта опасность возрастает, и наоборот.

Расчеты показали, что даже при токах шины менее 1 кА участки, прилегающие к отверстию для прохождения шины, находятся в состоянии сильного насыщения. В таблице 1 приведены полученные на основе моделирования значения токов шины, при которых составляющая индукции  $B_y$  в зазоре достигает значения  $B_{отп}$ , соответствующего отпаданию якоря.

### Компьютерное моделирование динамического режима

Громоздкость алгоритмов решения переходных процессов требует максимального упрощения геометрии рассматриваемых областей поля, т.к. при сложной конфигурации области не только возрастают требования к объемам памяти машины и времени расчета, но и возникают отказы в работе программы. Поэтому модель для расчета динамических процессов выбрана более простой по конфигурации в сравнении с моделью квазистационарных режимов (рис. 6).

Для исключения узких участков, требующих увеличения количества узлов расчетной сетки, вместо узкого воздушного зазора 0,2 мм введен участок высотой 6 мм, имеющий нулевую электропроводность и магнитную проницаемость  $\mu_r = 60$ , обеспечивающую магнитное сопротивление потоку, равное магнитному сопротивлению воздушного зазора. С той же целью уменьшено сечение медной шины до  $44 \times 11,4 = 500 \text{ мм}^2$

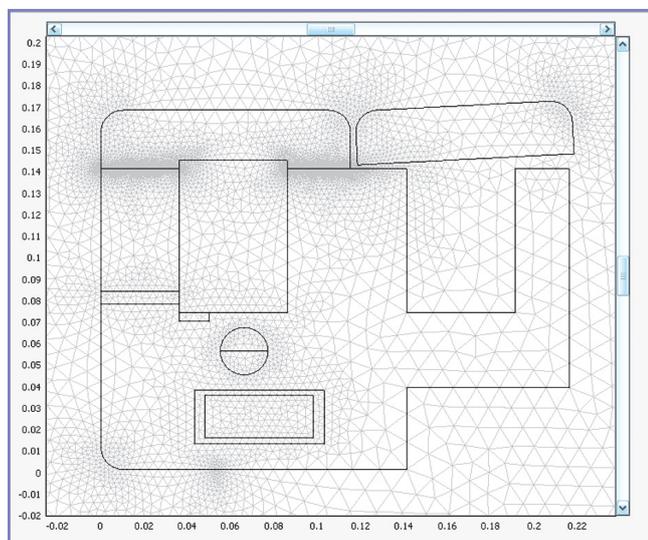


Рис. 2. Геометрия сердечника и сетка расчета магнитного поля для квазистационарных режимов

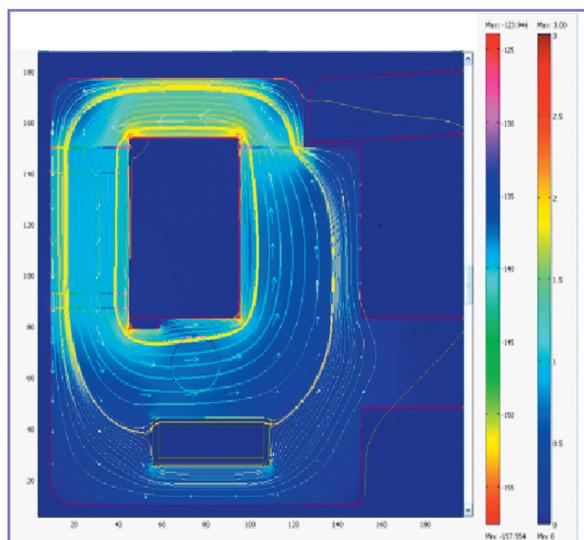


Рис. 3. Картина магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом ( $I = 0$ )

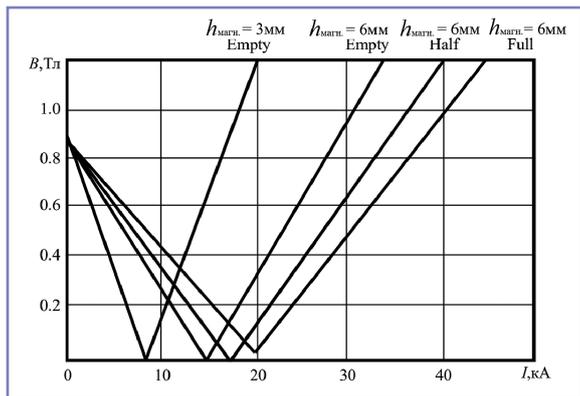


Рис. 4. Зависимость магнитной индукции  $B$  от тока в шине

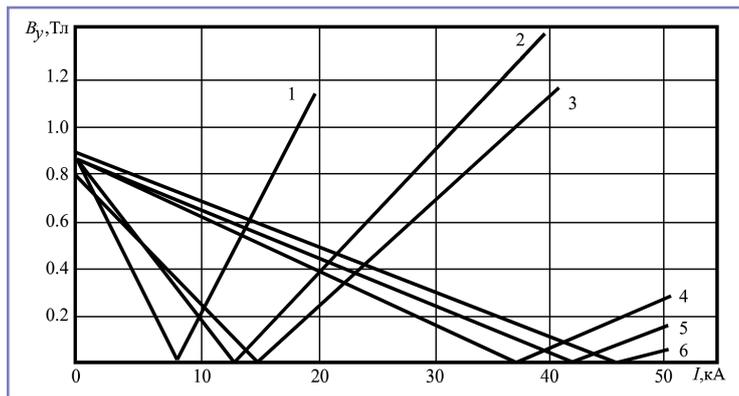


Рис. 5. Графики зависимости индукции в зазоре от тока нагрузки шины:  
1 -  $h_{\text{магн}} = 3$  мм, Full; 2 -  $h_{\text{магн}} = 3$  мм, Half; 3 -  $h_{\text{магн}} = 3$  мм, Empty;  
4 -  $h_{\text{магн}} = 12$  мм, Empty; 5 -  $h_{\text{магн}} = 12$  мм, Half; 6 -  $h_{\text{магн}} = 12$  мм, Full

Таблица 1. Рассчитанные на модели значения тока срабатывания  $I_{\text{отп}}$

$I_{\text{отп}}$ , кА	$\varnothing_{\text{отв}} = 22$ мм $h_{\text{магн}} = 3$ мм	$\varnothing_{\text{отв}} = 22$ мм $h_{\text{магн}} = 6$ мм	$\varnothing_{\text{отв}} = 22$ мм $h_{\text{магн}} = 12$ мм	$\varnothing_{\text{отв}} = 30$ мм $h_{\text{магн}} = 6$ мм
Режим «Full»	5,5	8,4	17,5	8,2
Режим «Half»	5,2	7,5	15,6	6,9
Режим «Empty»	2,7	6,1	13,4	4,6

$\varnothing_{\text{отв}}$  – диаметр регулировочного отверстия.

(соответственно увеличена расчетная плотность тока шины). В расчетах, где требовалось учесть влияние размагничивающего витка, охваченная им площадь сердечника замещалась стенкой из вещества, имеющего те же магнитные свойства, что и сам сердечник, но с удельной электропроводностью  $\sigma = 1,12 \times 10^8$  См/м, что обеспечивало эквивалентность этого участка стальному сердечнику, охваченному размагничивающим витком с постоянной времени затухания тока, намного превышающей длительность рассматриваемого процесса.

За начальный момент времени принимался момент подачи импульса тока – прямоугольного (при определении переходной характеристики магнитного потока) или косоугольного с различными скоростями нарастания тока. Для задания начального распределения потока рассчитывался установившийся режим воздействия постоянного магнита и постоянной составляющей тока шины (если ее наличие предусматривалось расчетом), далее это решение рассматривалось в качестве начального условия задачи. В результате находилось семейство кривых распределения нормальной составляющей вектора магнитной индукции  $B_y$  по длине левого зазора в заданные моменты времени, и временная зависимость  $B_y$  по которой определялось время достижения индукцией  $B_y$  величины  $B_{\text{отп}}$ .

Выполнялась вариация следующих параметров:

- степень заполнения сталью регулировочного отверстия;
  - форма импульса тока и скорость его нарастания;
  - толщина постоянного магнита;
  - длительность интервала времени расчета переходного процесса.
- Исследовались следующие режимы:
- режим «Full», ток  $I$  нарастает с нулевого значения со скоростью 500 А/мс;
  - режим «Full», ток  $I$  нарастает с нулевого значения со скоростью 2000 А/мс;
  - режим «Full», ток  $I$  нарастает с нулевого значения со скоростью 10000 А/мс;
  - режим «Half», ток  $I$  нарастает с нулевого значения со скоростью 500 А/мс.

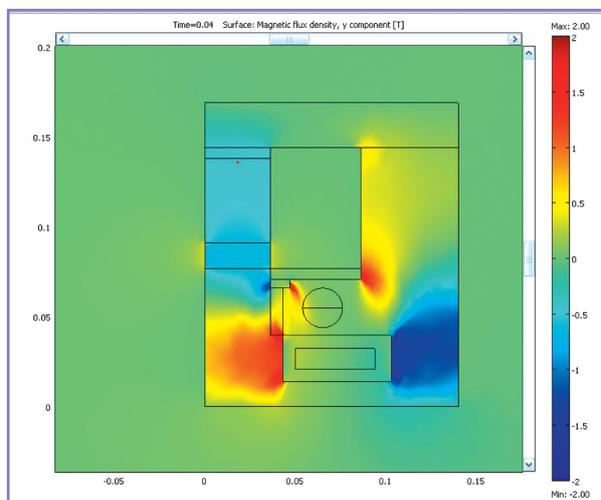


Рис. 6. Геометрия магнитной цепи магнитопровода для расчета динамических процессов. Цветом отмечена величина вертикальной составляющей магнитной индукции  $B_y$

### Моделирование при различной степени заполнения сталью регулировочного отверстия

**Режим «Full», ток  $I$  нарастает с нулевого значения со скоростью 500 А/мс**

На рис. 7 представлена временная зависимость  $B_y$  (сплошная линия), полученная для случая:  $h_{\text{магн}} = 6$  мм; воздушный зазор 6 мм при  $\mu_r = 60$ ; проводимость стали сердечника  $\sigma = 1,12 \times 10^3$  См/м;  $M_y = -800000$  ( $M_y$  – намагниченность постоянного магнита).

Для оценки запаздывания проникновения магнитного потока шины в область зазора на том же графике приведена кривая  $B_y(t)$  при прямоугольном импульсе тока амплитудой 5 кА (верхняя сплошная линия). Видно, что длительность фронта переходной характеристики не превышает 1 мс. Однако удельная электропроводность стали порядка  $\sigma = 1000$  См/м обеспечивается лишь в предположении, что вихревые токи в шихтованном сердечнике замыкаются только в пределах каждого из листов в отдельности, и листы лежат в плоскости, параллельной линиям магнитного потока. В конструкции выключателя возможны отклонения от этих условий, причем оценить эти характеристики расчетным путем практически невозможно. Поэтому были выполнены аналогичные расчеты при  $\sigma = 1,12 \times 10^4$  См/м (штриховые линии) и при  $\sigma = 1,12 \times 10^5$  См/м (штрих-пунктирные линии). Причем верхние графики соответствуют подаче прямоугольного импульса тока амплитудой 5 кА.

Из графиков видно, что увеличение эквивалентной проводимости до  $\sigma = 1,12 \times 10^4$  См/м приводит к росту времени фронта переходной характеристики приблизительно до 2 мс, а при  $\sigma = 1,12 \times 10^5$  См/м оно увеличивается до 8 мс. Растет и время запаздывания прихода магнитного потока, созданного током шины, к месту расположения зазора.

Расчеты  $B_y$  при том же воздействии тока со скоростью  $dI/dt = 500$  А/мс, но в другом диапазоне значений времени (от 2 до 20 мс) показали, что значение  $B_{\text{отп}}$  при  $\sigma = 1,12 \times 10^3$  См/м и заданной крутизне достигается практически без запаздывания.

Также исследовалось влияние размагничивающего витка на характер изменения  $V_y$  во времени (рис. 8). Как и следовало ожидать, действие витка проявляется в замедлении нарастания индукции.

Расчеты, выполненные для случаев нарастания тока со скоростью 2000 А/мс и 10000 А/мс, привели к аналогичным результатам.

**Режим «Half», ток I нарастает с нулевого значения со скоростью 500 А/мс**

Как показано на рис. 9, в этом случае срабатывание при проводимости стали сердечника  $\sigma = 1,12 \times 10^3$  См/м происходит при  $t = 0,006$  мс, когда ток шины достигает 3 кА. Увеличение проводимости до

$\sigma = 1,12 \times 10^4$  См/м увеличивает запаздывание на 1 мс, а до  $\sigma = 1,12 \times 10^5$  См/м – уже на 6 мс. Дальнейший рост проводимости может вызвать запаздывание более чем на десять микросекунд.

**Моделирование поля при вариации толщины магнита**

Моделирование проводилось для режимов «Full» и «Half» при следующих параметрах:  $M_y = -800000$ , воздушный зазор – 6 мм,  $\mu_r = 60$ , проводимость стали сердечника –  $1,12 \times 10^3$  См/м. Состояние размагничивающего витка – разомкнут или замкнут. Предполагалось, что косоугольный импульс тока нарастает с нулевого значения со скоростью 500 А/мс. Толщина постоянного магнита предполагалась равной 2 мм, 4 мм, 8 мм, 10 мм, 14 мм.

На рис. 10 показано изменение во времени индукции магнитного потока в воздушном зазоре в режиме «Full». Кривая 1 соответствует случаю разомкнутого размагничивающего витка. Видно, что в этом режиме время запаздывания потока на пути от шины до зазора

превышало бы 0,2 с. Здесь же приведена кривая 2 для случая, когда регулировочное отверстие заполнено наполовину. Случаю замкнутого витка соответствует кривая 3 (режим «Full») и кривая 4 (режим «Half»).

Результаты расчетов для  $h_{\text{магн}} = 4$  мм и режима «Full» приведены на рис. 11 (кривая 1). Размагничивающий виток разомкнут. Если виток замкнуть и использовать режим «Half», вначале скорость нарастания индукции (кривая 2) падает, но затем процесс ускоряется.

На рис. 12 приведены временные зависимости  $V_y$  для случая  $h_{\text{магн}} = 8$  мм, а на рис. 13 – для случая  $h_{\text{магн}} = 10$  мм.

В случаях толщин магнита, равных 10 мм (рис. 13) и 14 мм (рис. 14) характер зависимостей сохраняется.

Значения тока срабатывания (в килоамперах) при разной толщине постоянного магнита приведены в таблице 2.

**Моделирование поля при вариации величин проводимостей стали сердечника и стального стержня уставки**

Для случая  $h_{\text{магнит}} = 14$  мм в режиме «Full» ( $dl/dt = 500$  А/мс;  $M_y = -800000$ ; зазор 6 мм;  $\mu_r = 60$ ; размагничивающий виток разомкнут) исследовалось влияние проводимости стали сердечника на время достижения индукцией  $V_y$  величины  $V_{y\text{отп}}$  (рис. 15). Здесь линия на уровне  $V_y = -0,7$  Тл – индукция в зазоре при включении постоянного тока  $I = 5$  кА.

Как можно заметить, уменьшение проводимости стали сердечника ведет к снижению

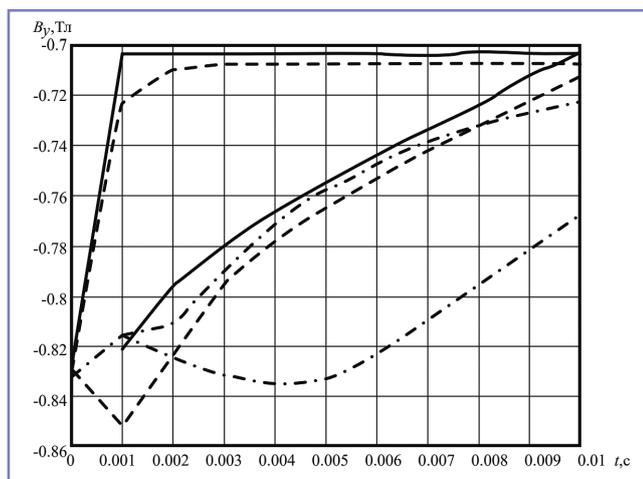


Рис. 7. Зависимость индукции  $V_y$  от времени при разных значениях проводимости стали магнитопровода: сплошные линии –  $1,12 \times 10^3$  См/м; штриховые линии –  $1,12 \times 10^4$  См/м; штрих-пунктирные –  $1,12 \times 10^5$  См/м

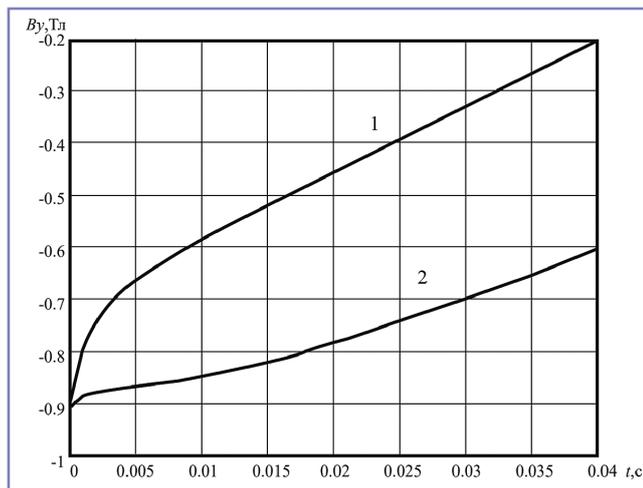


Рис. 8. Влияние размагничивающего витка на изменение  $V_y$  во времени при проводимости  $\sigma = 1,12 \times 10^3$  См/м: кривая 1 – размагничивающий виток разомкнут; кривая 2 – размагничивающий виток замкнут

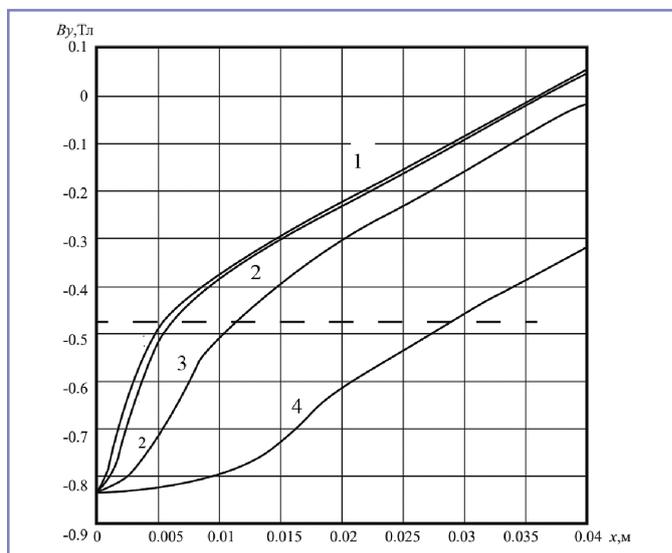


Рис. 9. Зависимость распределения  $V_y$  по длине зазора при:  $\sigma = 1,12 \times 10^3$  См/м (кривая 1);  $\sigma = 1,12 \times 10^4$  См/м (кривая 2);  $\sigma = 1,12 \times 10^5$  См/м (кривая 3) и  $\sigma = 1,12 \times 10^6$  См/м (кривая 4)

Таблица 2. Значения тока срабатывания (в килоамперах) при разной толщине постоянного магнита

Режим	Толщина магнита											
	2 мм		4 мм		6 мм		8 мм		10 мм		14 мм	
	Full	Half	Full	Half	Full	Half	Full	Half	Full	Half	Full	Half
Размагничивающий виток разомкнут	3,25	1	7,0	2	9,2	3,1	11,3	4,2	13	5,5	16	7,1

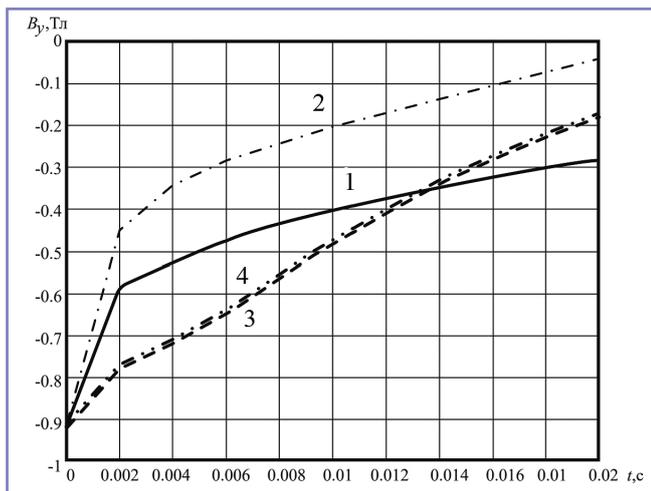


Рис. 10. Зависимость  $V_y$  от времени при различной степени заполнения сталью регулировочного отверстия и состоянии размагничивающего витка

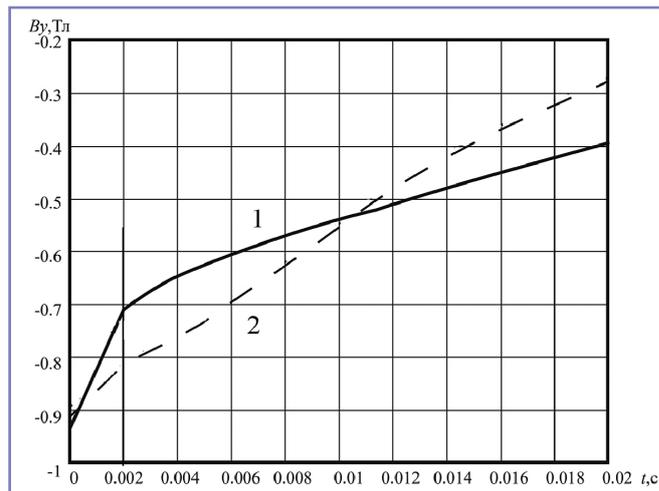


Рис. 11. Зависимость  $V_y$  от времени: кривая 1 – режим «Full», размагничивающий виток разомкнут; кривая 2 – режим «Half», размагничивающий виток замкнут

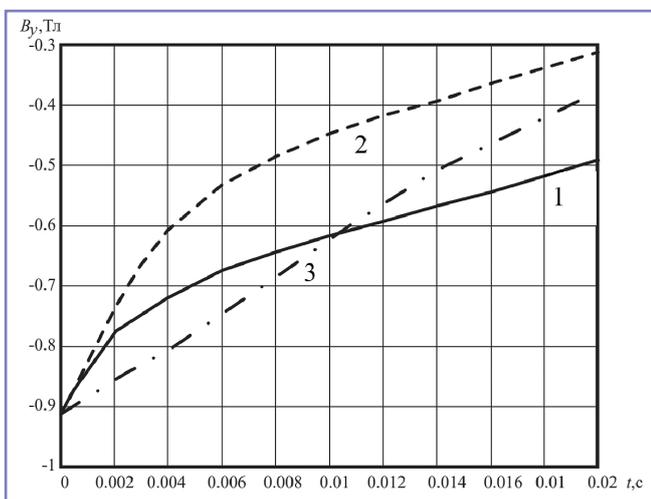


Рис. 12. Зависимость  $V_y$  от времени: кривая 1 – режим «Full», размагничивающий виток разомкнут; кривая 2 – режим «Half», размагничивающий виток разомкнут; кривая 3 – режим «Half», размагничивающий виток замкнут

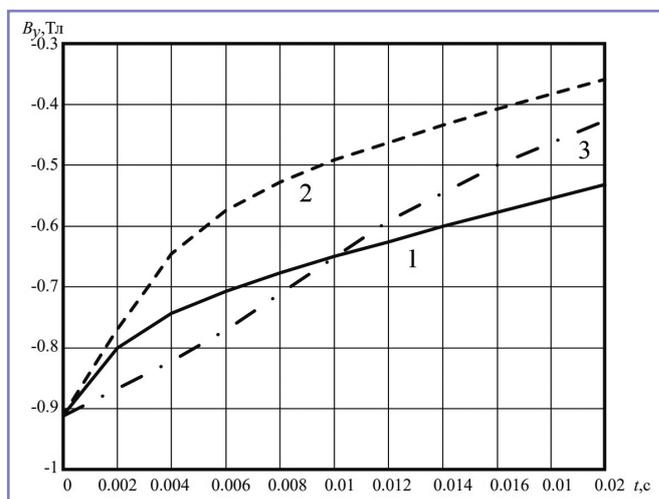


Рис. 13. Зависимость  $V_y$  от времени: кривая 1 – режим «Full», размагничивающий виток разомкнут; кривая 2 – режим «Half», размагничивающий виток разомкнут; кривая 3 – режим «Half», размагничивающий виток замкнут

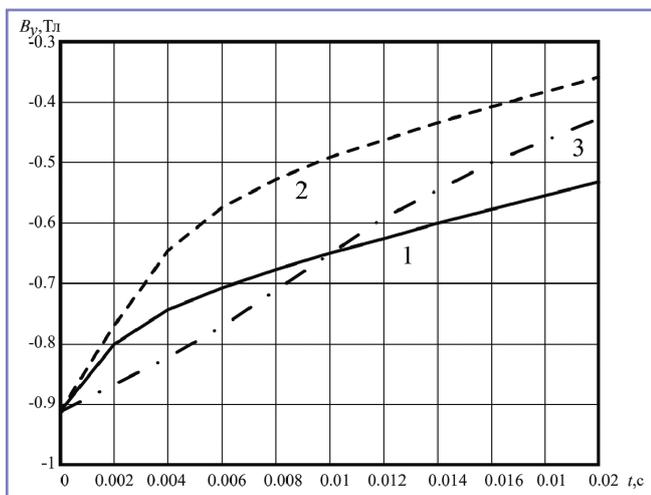


Рис. 14. Зависимость  $V_y$  от времени: кривая 1 – режим «Full», размагничивающий виток разомкнут; кривая 2 – режим «Half», размагничивающий виток разомкнут; кривая 3 – режим «Half», размагничивающий виток замкнут

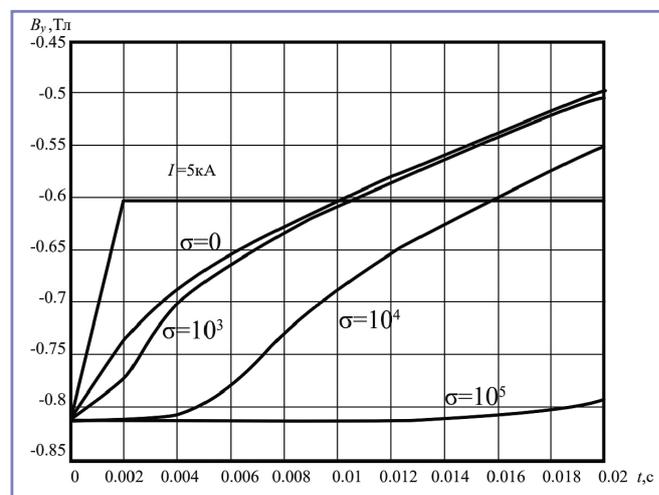


Рис. 15. Зависимости  $V_y$  от времени при различной величине проводимости стали сердечника

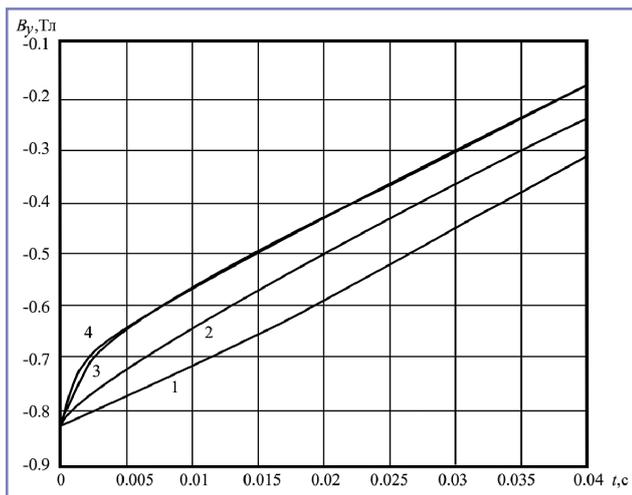


Рис. 16. Временные зависимости  $V_u$  для различных значений удельной проводимости стального стержня уставки: кривая 1 –  $\sigma = 1,12 \times 10^7$  См/м; кривая 2 –  $\sigma = 1,12 \times 10^5$  См/м; кривая 3 –  $\sigma = 1,12 \times 10^4$  См/м; кривая 4 –  $\sigma = 1,12 \times 10^3$  См/м

времени достижения индукцией  $V_u$  величины  $V_{отп}$ . При проводимости  $\sigma = 1000$  См/м задержка практически отсутствует; при проводимости  $\sigma = 10000$  См/м задержка составляет единицы микросекунд, а при проводимости порядка  $\sigma = 100000$  См/м задержка может достигать десятка микросекунд

Исследовалось влияние величины проводимости стального стержня уставки на время достижения индукцией  $V_u$  величины  $V_{отп}$ . Рассматривался режим «Full» со следующими параметрами: крутизна тока  $dI/dt = 500$  А/мс;  $h_{магн.} = 6$  мм;  $\sigma = 1,12 \times 10^3$  См/м;  $M_y = -800000$ ; размагничивающий виток имел  $\mu_r = 1$ ;  $\sigma = 0$  (рис. 16).

Можно видеть, что увеличение проводимости стержня уставки приводит к снижению скорости нарастания индукции.

## Выводы

1. При наличии размагничивающего витка возле регулировочного отверстия не происходит ускорения роста магнитного потока в зазоре, наблюдается обратный эффект – замедление подхода индукции  $V_u$  в зазоре к значению  $V_{отп}$ . Размагничивающий виток играет позитивную роль в смысле предотвращения залипания якоря при быстрых нарастаниях индукции обратной полярности в зазоре при больших токах короткого замыкания.

2. Задержка во времени между моментом, когда ток шины достигнет тока уставки выключателя, и моментом расхождения якоря и ярма в динамическом режиме в первую очередь определяется эквивалентной проводимостью стали сердечника, зависящей от свойств его материала и технологии изготовления сердечника.

3. Задержка во времени между моментом достижения тока величины тока уставки и моментом отпадания якоря практически не зависит от толщины магнита.

4. Существенную задержку вносит изготовление регулировочного стержня из сплошного металла.

5. Для снижения времени отключения целесообразно улучшить изоляцию пластин магнитопровода между собой, а также относительно металлических крепежных деталей.

## Литература

1. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов – М.: Транспорт, 1986. – 320 с.

2. Агафонов Г.Е., Бабкин И.В., Берлин Б.Е. и др.; под ред. Ю.И. Вишневого. – СПб: Энергоатомиздат, 2002. – 727 с.

3. Набатов К.А., Афонин В.В. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств / К.А. Набатов, В.В. Афонин – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.

4. Аполлонский С.М., Фролов В.Я. Электрические аппараты управления и автоматики / С.М. Аполлонский, Ю.В. Куклев, В.Я. Фролов – СПб: Лань, 2021. – 256 с.

5. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости / К.К. Ким. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. – 360 с.

6. Ким К.К., Анисимов Г.Н., Чураков А.И. Средства электрических измерений и их поверка / К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, А.И. Чураков – СПб.: Лань, 2021. – 316 с.

7. Ким К.К., Анисимов Г.Н., Барбарович В.Ю., Литвинов Б.Я. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника / К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, В.Ю. Барбарович, Б.Я. Литвинов – СПб: ПИТЕР, 2006. – 367 с.

8. Nikitin, V. V., Sychugov, A. N., Rolle, I.A. et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. Russ. Electr. Engin. 91, 87–92 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068371220020078>

9. Titova, T. S., Evstaf'ev, A. M. & Nikitin, V.V. The Use of Energy Storages to Increase the Energy Effectiveness of Traction Rolling Stock. Russ. Electr. Engin. 89, 576–580 (2018). <https://doi.org/10.3103/S1068371218100097>

10. Marikin, A. N., Miroshchenko, V. A., Nikitin, V.V. et al. A controlled device for reactive-power compensation for electrified alternating-current railroads. Russ. Electr. Engin. 88, 639–642 (2017). <https://doi.org/10.3103/S1068371217100091>

## Ким Константин Константинович

Родился в 1958 году. В 1980 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Инженерная электрофизика». Доктор технических наук, профессор. В 1998 году защитил диссертацию по теме «Электродинамика и характеристики систем электродвижения со сверхпроводящими обмотками и магнитным подвесом». Опыт работы – более 40 лет. В настоящее время рабо-

тает заведующим кафедрой «Теоретические основы электротехники» ПГУПС. Имеет более 560 научных трудов, из них 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». Кандидат экономических наук, доцент. В 2001 году защитил диссертацию по теме «Оценка и прогнозирования эффективного использования материально-энергетических ресурсов в структурных подразделениях железнодорожного транспорта». Опыт работы – 25 лет. В настоящее время является ректором Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Имеет более 100 научных работ.

## Ватаев Андрей Сергеевич

Родился в 1974 году. В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Электрические машины». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Высокочастотные электромагнитные процессы и перенапряжения в частотно-регулируемых асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС.

## Kim Konstantin

Was born in 1958. In 1980 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 40 years of work experience. Currently he works as head of the department of "Theoretical Foundations of Electrical Engineering" 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 – 25 years. At present he is a rector of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. He has more than 100 scientific papers.

## Vataev Andrey

Was born in 1974. In 2005 he graduated from the St. Petersburg State Polytechnic University with a degree in "Electrical Machines". Candidate of engineering sciences. In 2009 he defended thesis on "High-frequency electromagnetic processes and overvoltage in frequency-controlled asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor." Work experience – 13 years. Currently works as an associate professor of the Department of "Electrical Engineering and Heat Power Engineering" at PGUPS.

# К вопросу определения емкости накопителя энергии для тягового подвижного состава железных дорог

// To the question of determining the capacity of the energy storage for traction rolling storage of railways //

**Валинский О. С.,**  
ОАО «РЖД», Москва

**Евстафьев А. М., д.т.н., профессор,**  
**Никитин В. В., д.т.н., доцент,**  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Повышение энергетической эффективности тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, а также метрополитенов является одной из приоритетных задач развития транспортной отрасли. Эффективным способом снижения расхода энергетических ресурсов на тяговые нужды является применение бортовых накопителей энергии в составе энергетических комплексов тягового подвижного состава, позволяющих обеспечить наиболее экономичный режим работы силовой энергетической установки любого типа подвижного состава при выполнении перевозочной работы различного характера. Одним из наиболее важных вопросов при разработке тягового подвижного состава с бортовыми накопителями энергии представляется вопрос об оценке энергоемкости накопителя энергии. В статье предложен подход к определению энергоемкости бортового накопителя на основе его функционального назначения в соответствии с характером перевозочной работы, выполняемой данным видом тягового подвижного состава, дан анализ и обобщение способов оценки энергоемкости бортовых накопителей электрической энергии.*

*Ключевые слова:* тяговый подвижной состав, энергетическая эффективность, накопители энергии.

Тяговый подвижной состав магистральных железных дорог, промышленных и горнодобывающих предприятий является одним из крупнейших потребителей энергетических ресурсов транспортной отрасли. В связи с этим, а также по той причине, что в настоящее время стоимость энергетических ресурсов демонстрирует устойчивую тенденцию роста, ведущие мировые производители стремятся снизить потребление

*Increasing the energy efficiency of traction rolling stock of mainline and industrial railway transport, as well as subways, is one of the priority tasks for the development of the transport industry. An effective way to reduce the consumption of energy resources for traction needs is the use of on-board energy storage units as part of the power complexes of traction rolling stock, which make it possible to provide the most economical operating mode of a power plant of any type of rolling stock when performing transportation work of a different nature. One of the most important issues in the development of traction rolling stock with on-board energy storage devices is the question of assessing the energy intensity of an energy storage device. The article proposes an approach to determining the energy intensity of an on-board storage device based on its functional purpose in accordance with the nature of the transportation work performed by this type of traction rolling stock, an analysis and generalization of methods for assessing the energy intensity of on-board electric energy storage devices is given.*

*Keywords:* tractive rolling stock, energy efficiency, energy storages.

энергии тяговым подвижным составом на единицу перевозочной работы. Повышение энергетической эффективности тяговой единицы может быть обеспечено за счет улучшения конструкции и качества изготовления основных компонентов тягового энергетического комплекса, осуществляющих выработку и преобразование энергии, расходуемой на тяговые нужды, а также за счет совершенствования вспомогательного

оборудования подвижного состава, обеспечивающего собственные нужды. Однако наиболее эффективным инструментом сокращения расхода энергетических ресурсов на тяговые нужды следует считать включение в состав главных энергетических комплексов тягового подвижного состава бортовых накопителей энергии, которые принципиально позволяют обеспечить наиболее экономичный режим работы силовой энергетической установки любого типа тягового подвижного состава (автономного, электрического, гибридного) при выполнении перевозочной работы самого различного характера (дальние пассажирские, пригородные перевозки, грузовые магистральные перевозки, перевозки внутри территории промышленного или горнодобывающего предприятия).

## Требования к бортовым накопителям энергии для тягового подвижного состава

Для использования на тяговом подвижном составе в условиях ограниченных габаритов, резко переменных режимов работы, воздействия механических нагрузок и при различных климатических условиях накопители энергии должны иметь высокую удельную энергоемкость, т.е. способность запасать большую энергию при малых массе и габаритах, обеспечивать гибкость управления и возможность быстрого перехода из режима заряда в режим разряда и обратно, обеспечивать безопасность персонала, совместимость с другими видами оборудования и возможность быстрого вывода энергии в аварийных режимах. В настоящее время известно множество накопителей энергии различного физического принципа действия, однако современный тяговый подвижной состав реализует тяговые и тормозные усилия за счет выработки (автономный подвижной состав) или получения от контактной сети (неавтономный подвижной состав) и преобразования электрической энергии, поэтому в состав бортовых тяговых энергетических комплексов подвижного состава целесообразно включать накопители электрической энергии, либо электромеханические накопители энергии. По своим технико-экономическим показателям в наибольшей мере условиям и режимам функционирования в составе силовых энергетических

Таблица 1. Сравнительные данные основных видов накопителей энергии

Параметр	Кислотные АБ	Литий-ионные АБ	Суперконденсаторы	СПИН	ЭМН
Стоимость энергии, долл./кВт*ч	225...250	500...2000	200...300	500...2000	300...2000
Стоимость мощности, долл./кВт	250...300	1300...3800	300...600	300...500	250...400
Максимальный КПД цикла заряд-разряд	0,85	0,96	0,95	0,95	0,9...0,93
Удельная энергоёмкость, Вт*ч/кг	50...100	120...200	10...15	150...200	200...250
Количество циклов заряда-разряда	$10^2...10^3$	$10^3$	$10^5...10^6$	$10^6$	$10^5$
Время заряда (разряда), мин.	$10^2$	$10...10^2$	$1...10$	$10...10^2$	10
Экологичность	средняя	хорошая	хорошая	хорошая	хорошая

установок тягового подвижного состава соответствуют накопители электрической энергии в виде емкостных (суперконденсаторных) батарей, электрохимические накопители энергии в виде аккумуляторных батарей, а также накопители кинетической энергии, работающие совместно с электрохимическими преобразователями энергии (электромеханические накопители энергии) [1]. Сравнительные данные указанных видов накопителей энергии представлены в таблице 1. Использование механических и индуктивных, в том числе криогенно охлаждаемых, накопителей энергии применительно к тяговому подвижному составу железных дорог в настоящее время следует признать проблематичным.

Первый вопрос, который приходится решать при разработке тягового подвижного состава с бортовыми накопителями энергии, является вопрос о расчетной (номинальной) энергоёмкости накопителя, от которой зависит его стоимость, масса, габариты и количество запасаемой энергии, что в конечном счете определяет экономическую целесообразность его использования в составе тягового энергетического комплекса подвижного состава. При этом в первую очередь следует учитывать назначение данной единицы подвижного состава, характер выполняемой перевозочной работы и типовые режимы его работы. Исходя из этого требования, бортовые накопители энергии для тягового подвижного состава целесообразно разделить на следующие группы: накопители, обеспечивающие выравнивание графика потребления мощности от первичного источника энергии; накопители энергии, обеспечивающие аккумулирование энергии в автономном торможении подвижного состава; накопители энергии, обеспечивающие аккумулирование избыточной энергии рекуперативного торможения; накопители энергии для обеспечения собственных нужд подвижного состава или энергообеспечения основного тягового электрооборудования в специфических условиях работы, например, при возникновении буксования колесных пар [2, 3]. В дальнейшем рассматриваются накопители энергии, обеспечивающие

тяговые нужды подвижного состава магистральных, промышленных и городских железных дорог.

### Энергоёмкость накопителя, обеспечивающего выравнивание графика потребления мощности от первичного источника

Для первичных тепловых двигателей автономного тягового подвижного состава (тепловозов, газотурбовозов) характерен неравномерный график нагрузки. По оценкам специалистов АО ВНИКТИ (г. Коломна), наиболее вероятное относительное время работы первичного двигателя магистрального автономного локомотива под нагрузкой составляет 45...70%, а в режиме холостого хода – 30...55%, при этом при работе в тяговом режиме первичный двигатель автономного локомотива нагружен чаще всего на 40...80% номинальной мощности [4]. Для автономных локомотивов, выполняющих маневрово-вывозную работу, доля времени работы под нагрузкой составляет всего 5...16%, а доля времени работы в режиме холостого хода – 37...68%, при этом при работе в тяговом режиме силовая установка маневрового локомотива нагружена, как правило, на 25...35% номинальной мощности.

При работе в режиме частичных нагрузок и холостого хода удельный расход топлива первичным тепловым двигателем повышается, растет количество вредных выбросов в атмосферу. Использование бортового накопителя энергии в связке с первичным тепловым двигателем принципиально позволяет уменьшить мощность и выровнять график потребления мощности от последнего за счет того, что в периоды малых нагрузок или в режиме холостого хода тепловой двигатель может работать в режиме, близком к номинальному, при этом избыток вырабатываемой энергии будет запасаться в бортовом накопителе. В интервалы повышенных нагрузок первичный источник энергии (дизель-генератор или турбогенератор) может работать совместно с накопителем энергии, обеспечивая необходимую тяговую мощность [5, 6].

Для первичных тепловых двигателей автономных локомотивов в той или иной мере характерна цикличность нагрузок, типовые параметры которой могут быть установлены путем статистической обработки массива экспериментальных данных. Если для интервала цикличности  $[0, T]$  известна среднестатистическая кривая потребления мощности от дизель-генератора (или турбогенератора)  $p_r(t)$ , тогда средняя мощность генератора

$$P_{г.ср} = \frac{1}{T} \int_0^T p_r(t) dt.$$

Эту мощность можно считать расчетной (номинальной) мощностью первичного источника энергии для автономного локомотива с бортовым накопителем энергии.

При разряде за время  $(t_1 - t_0)$  работы в тяговом режиме убыль энергии, запасенной предварительно в накопителе, составит

$$\Delta W_p^{нэ} = W_T - P_{г.ср}(t_1 - t_0),$$

где  $W_T$  – энергия, расходуемая на тяговые нужды.

На этапе заряда приращение энергии накопителя

$$\Delta W_3^{нэ} = W_B + P_{г.ср}(t_1 - t_0),$$

где  $W_B$  – энергия, генерируемая тяговыми двигателями, работающими в режиме электрического торможения.

Максимальные значения приращения и убыли энергии накопителя на интервале времени  $[0, T]$  составят:

$$\max(\Delta W_p^{нэ}) \text{ и } \max(\Delta W_3^{нэ}).$$

Требуемое значение энергоёмкости накопителя может быть найдено из условия:

$$W^{нэ} = \max[\max(\Delta W_p^{нэ}); \max(\Delta W_3^{нэ})] + W_H,$$

где  $W_H$  – неиспользуемый («мертвый») запас энергии накопителя.

Максимальная мощность накопителя при разряде:

$$P_{р.макс}^{нэ} = \max(P_{г.т}) - P_{г.ср},$$

где  $P_{г.т}$  – мощность, развиваемая первичным тепловым двигателем автономного локомотива без накопителя энергии.

Максимальная мощность накопителя при заряде:

$$P_{з.макс}^{нэ} = \max[P_{д.т}] + P_{г.ср},$$

где  $P_{д.т}$  – мощность, развиваемая тяговыми двигателями при электрическом торможении.

По различным оценкам [6, 7], для обеспечения среднестатистического режима работы маневрового тепловоза с бортовым накопителем энергии при постоянстве мощности дизель-генератора  $P_g = P_{г.ср} = \text{const}$  необходима мощность генератора  $P_g = 400$  кВт и энергоёмкость бортового накопителя  $W^{нэ} = 100 \dots 120$  МДж.

**Энергоемкость накопителя, обеспечивающего аккумуляцию энергии остановочного торможения подвижного состава**

Подвижной состав, выполняющий пригородные (моторвагонный подвижной состав железных дорог) и городские перевозки (подвижной состав метрополитенов) работает, как правило, в чередующихся режимах тяги, вы бега и торможения между остановочными пунктами. Известно, что наибольшее энергопотребление имеет место в режиме пуска и разгона, когда электропоезд движется с ускорением. В то же время значительная часть энергии, расходуемой на разгон транспортного средства, теряется безвозвратно в тормозных реостатах при электрическом реостатном торможении и тормозных колодках при механическом фрикционном торможении подвижного состава.

Несмотря на то, что мощность, потребляемая на тяговые нужды, в каждом конкретном случае будет различна и будет зависеть от длины перегона, профиля пути, загрузки подвижного состава, оперативной обстановки и других факторов, можно установить наиболее вероятные время-мощностные характеристики типовых режимов работы данного класса подвижного состава. В частности, для пригородного движения на участках Московского железнодорожного узла длительность режима тяги составляет 30...100 с, длительность вы бега и стоянки на остановочных пунктах – 40...100 с, длительность тормозных режимов – 30...60 с [8, 9].

Если известна среднестатистическая кривая мощности тяговых двигателей  $p(t)$ , тогда энергия, запасаемая в накопителе при электрическом торможении подвижного состава:

$$W_3 = \eta \int_0^{t_r} (p(t) - P_{\text{сн}}) dt,$$

где  $\eta$  – КПД цепи передачи и преобразования энергии от тягового двигателя до бортового накопителя;

$t_r$  – время торможения;

$P_{\text{сн}}$  – мощность, расходуемая на обеспечение собственных нужд.

Оценку энергоемкости накопителя в этом случае целесообразно выполнять для интервала времени торможения  $t_r$ , на котором с учетом типовых режимов движения может быть запасена максимальная энергия.

По некоторым оценкам [10], энергоемкость накопителя для подвижного состава городского электротранспорта может составлять  $W_{\text{НЭ}} = 1,5 \dots 2,5$  МДж, энергоемкость накопителя для десятивагонного пригородного электропоезда и электропоезда метрополитена оценивается в  $W_{\text{НЭ}} = 50 \dots 80$  МДж.

**Энергоемкость накопителя для аккумуляции избыточной энергии рекуперативного торможения подвижного состава**

Рекуперативное торможение магистрального подвижного состава в пассажирском и грузовом движении принципиально является мощным инструментом энергосбережения. Однако на практике энергетическая эффективность рекуперативного торможения не столь высока, как первоначально ожидалось. Причиной тому является специфика данного вида торможения, которое может быть реализовано только в том случае, если для рекуперированной энергии в данный момент времени в тяговой сети имеется потребитель. Кроме того, рекуперация энергии наиболее эффективна на участках, имеющих горный и холмистый профиль пути. На участках со значительными объемами движения значительная часть энергии рекуперативного торможения может потребляться электрическим подвижным составом, работающими в режиме тяги. Необходимость аккумуляции энергии в бортовом накопителе возникает лишь для избыточной энергии рекуперативного торможения, которая нежелательна в тяговой сети по той причине, что может приводить к повышению напряжения контактной сети и прекращению режима торможения.

Оценка емкости бортового накопителя энергии для аккумуляции избыточной энергии рекуперативного торможения практически не поддается унификации и формализации, т.к. количество избыточной энергии определяется множеством факторов, в том числе и случайных: серий и характеристиками эксплуатируемых электровозов, профилем пути участка, характеристиками тяговой сети, графиком движения поездов, взаимным расположением и сочетанием режимов работы электровозов, работающих в режимах тяги и рекуперативного торможения, массой поездов и т.д. В частности, методика оценки энергоемкости бортового накопителя для аккумуляции избыточной энергии рекуперативного торможения, предложенная в [11, 12], заключается в моделировании текущих токовых нагрузок конкретного участка, на котором осуществляется рекуперативное торможение, с учетом размещения тяговых подстанций, электрических характеристик тяговой сети, мгновенного расположения поездов и режима работы электровозов (тяга, рекуперативное торможение). В результате моделирования находятя интервалы времени, в течение которых напряжение на токоприемнике электровоза может быть больше допустимого. Для этих интервалов определяется избыточная энергия из условия сохранения напряжения на токоприемнике на допустимом уровне. По оценкам, приведенным в [11], энергоемкость бортового накопителя для аккумуляции избыточной энергии рекуперативного торможения может достигать  $W_{\text{НЭ}} = 1000$  МДж.

**Выводы**

Оценку емкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава целесообразно выполнять, исходя из типа и характера выполняемой перевозочной работы. По этому признаку бортовые накопители энергии для обеспечения тяговых нужд можно сгруппировать следующим образом: накопители, обеспечивающие выравнивание графика потребления мощности от первичного источника энергии; накопители энергии, обеспечивающие аккумуляцию энергии остановочного торможения подвижного состава; накопители энергии, обеспечивающие аккумуляцию избыточной энергии рекуперативного торможения подвижного состава. По предварительным оценкам, основанным на обработке статистических данных о типовых режимах работы тягового подвижного состава, бортовой накопитель энергии для маневрового автономного локомотива должен иметь энергоемкость 100...120 МДж. Энергоемкость накопителя для десятивагонного пригородного электропоезда и электропоезда метрополитена составляет 50...80 МДж. Энергоемкость накопителя, обеспечивающего аккумуляцию избыточной энергии рекуперативного торможения магистрального электроподвижного состава в грузовом движении может составлять 1000 МДж и более в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

**Литература**

1. 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.
2. Охотников Н.С. Повышение тяговых свойств электроподвижного состава при помощи накопителей энергии // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – № 3. – С. 27–31.
3. Охотников Н.С. Использование накопителей энергии для повышения тяговых свойств электровозов // Вестник ВНИИЖТ. – 2010. – № 5. – С. 33–36.
4. Коссов В.С. О технико-экономическом обосновании эффективности применения газотурбовоза ГТ1h-002 // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 9. – С. 43–45.
5. Носков В.Н. Об энергоемкости накопителя энергии для тепловоза / В.Н. Носков, М.Ю. Пустоветов // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 5. – С. 42–44.
6. Пустоветов М.Ю. Об энергоемкости накопителя энергии для размещения на борту маневрового тепловоза / М.Ю. Пустоветов, В.Н. Носков // Инновационные технологии и процессы производства в машиностроении: Междунар. сб. науч. трудов. Ростов-н-Д.: Ростовская гос. академия с.-х. машиностроения, 2008. – С. 83–87.
7. Destrax B., Barrade P., Rufer A. Supercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives. SPEEDAM 2004, June 16th-18th, Capri, Italy.

8. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии. Дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 / М. Павелчик. – М.: МГУПС, 2000. – 451 с.

9. Павелчик М. Сглаживание неравномерности потребления электроэнергии в энергосистемах при помощи накопителей энергии и определение параметров накопителей. // Второй Международный Симпозиум «Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте». Москва 2000. Сборник трудов. – С. 63–66.

10. Щуров Н.И. Определение параметров накопительного устройства для электротранспортного комплекса / Н.И. Щуров, А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов [и др.] // Электричество. – 2007. – № 6. – С. 53–56.

11. Авилов В.Д. Определение энергоемкости и мощности накопителя энергии для грузового электровоза постоянного тока / В.Д. Авилов, Ю.В. Москалев, С.А. Писаренко // Известия Транссиба. – 2013. – № 4 (16). – С. 51–58.

12. Авилов В.Д. Определение энергоемкости накопителя энергии для грузового электровоза постоянного тока и использованием имитационного моделирования / В.Д. Авилов, Ю.В. Москалев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 306–310.

#### **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 – 38 лет. В настоящее время работает заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Дирекции тяги. Имеет более 25 научных публикаций.

#### **Евстафьев Андрей Михайлович**

Родился в 1979 году. В 2001 году окончил ПГУПС по специальности «Электрический транспорт». Доктор технических наук, профессор. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава». Опыт работы – 19 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 – 33 года. 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.

#### **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 38 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 more than 25 scientific works.

#### **Evstafev Adnrey**

Was born in 1979. He graduated from PGUPS majoring in "Electric transport". He is a doctor of technical sciences, professor. In 2018 he defended the dissertation with topic "Energy efficiency improvement of electric rolling stock". He has 19 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 33 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.

# Моделирование режима одностороннего включения линии электропередач 750 кВ на холостой ход

// Simulation of no-load switch-on mode of 750 kV power line //

Марикин А. Н., д.т.н., профессор,  
Агунов А. В., д.т.н., профессор,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

Морозов С. В., к.т.н.,  
Пугачев А. А., д.т.н., доцент,  
Брянский государственный технический университет, Брянск

Выполнено моделирование режимов одностороннего включения воздушных линий электропередач 750 кВ, содержащих значительную апериодическую составляющую тока, на холостой ход с использованием программного комплекса MATLAB. Определена амплитуда и длительность затухания апериодической составляющей тока, который проходит через выключатель. Осуществлена проверка возможности быстрой коммутации выключателя при неправильной работе основных защит линии электропередачи в режимах одностороннего включения на холостой ход. Разработаны рекомендации по уменьшению негативного влияния апериодической составляющей тока на условия работы выключателей типа GL318 фирмы ALSTOM–AREVA, установленных на линии электропередач.

**Ключевые слова:** апериодическая составляющая тока, высоковольтная линия, холостой ход, выключатель, шунтирующий реактор, схема замещения прямой последовательности.

Надежность электроснабжения тяговых подстанций, применяемых для обеспечения электрической энергией электровозов, электропоездов, трамваев, троллейбусов, зависит от надежной и бесперебойной работы всей электрической сети в целом, от источника электрической энергии до конечного потребителя.

В момент оперативного включения от ключа управления линии электропередач (ЛЭП) происходит односторонняя подача напряжения в ЛЭП, что приводит к появлению апериодической составляющей тока, которая приводит к достаточно значительному времени неперехода тока через нуль. Технические характеристики выключателей, особенно современных, таковы, что попытка

Simulation of no-load switch-on mode of 750 kV power line with significant value of aperiodic component of current is carried out by means of MATLAB. The magnitude and attenuation time of aperiodic component of current of the switchgear are determined. The verification of possibility of high-frequent switching of the switchgear at the different faults and malfunctions of power line protections in the no-load switch-on modes. The recommendations on diminishing the influence of aperiodic component of current on the work conditions of the GL318 switchgears manufactured by ALSTOM–AREVA mounted on the power line.

**Keywords:** aperiodic component of current, power line, no-load mode, switch, shunt reactor, equivalent circuit of direct sequence.

разорвать цепь с током, содержащим значительную апериодическую составляющую, может привести к его разрушению [1,2,3], что и произошло на одной из подстанций (ПС) 750 кВ с выключателем типа GL318 фирмы ALSTOM–AREVA вскоре после замены его с ВВБ-750 [4,5,6] вследствие возникновения длительно не погасающей дуги между контактами одной фазы выключателя.

Физически это можно пояснить следующим образом. Когда силовые контакты выключателя размыкаются, появляется электрическая дуга, состоящая из высокоионизированной плазмы, которая соединяет пространство между контактами. Электрическую дугу необходимо погасить прежде, чем произойдет разрыв цепи тока при ближайшем переходе тока через нуль. Очевидно, что наличие апериодической составляющей увеличивает величину тока, протекающего через контакты силового выключателя (рис. 1). Это, в свою очередь, приводит к увеличению степени ионизации плазмы в электрической дуге перед разрывом цепи тока, что может вызвать необратимые повреждения в выключателе. Последнее максимальное значение тока (точка 1 на рис. 1) перед его переходом через нуль (точка 2 на рис. 1) является критическим параметром, определяющим надежность работы выключателя [7]. Для уменьшения степени ионизации плазмы предложены различные технические и конструктивные мероприятия [1, 2, 7, 8]. Одним из направлений является уменьшение времени неперехода тока через нуль и уменьшение длительности затухания апериодической составляющей тока, т.к. это существенно снизит максимальное значение тока перед разрывом цепи.

В данной статье предложено одно из решений задачи коммутации элегазовыми выключателями на линиях высокого и сверхвысокого напряжения, содержащих значительную апериодическую составляющую тока в определенных режимах работы за счет выборочного

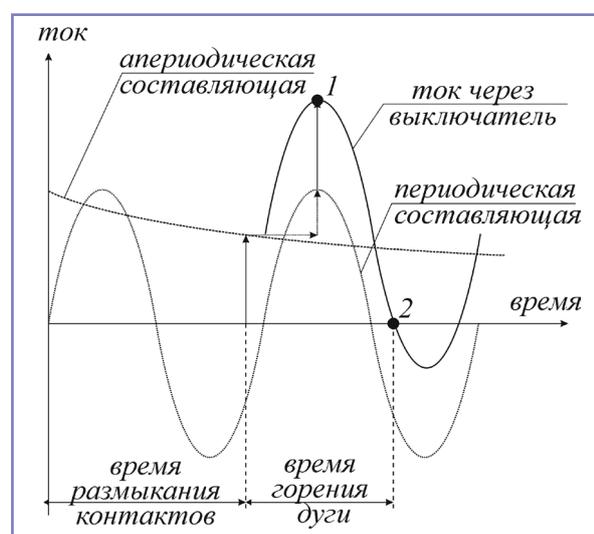


Рис. 1. Смещение тока через силовые контакты выключателя из-за появления апериодической составляющей

отключения шунтирующих реакторов электрической системы.

Известно, что амплитуда и постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока являются функцией отношения параметров электрической системы  $R_{\text{экв}}/X_{\text{экв}}$  ( $R_{\text{экв}}$  – активное сопротивление,  $X_{\text{экв}}$  – реактивное сопротивление электрической системы) и фазы напряжения на силовых контактах выключателя при его замыкании [9]. Параметры ЛЭП, количество и параметры установившихся устройств поперечной компенсации (шунтирующих реакторов, сопротивлений источников) влияют на отношение  $R_{\text{экв}}/X_{\text{экв}}$ . Уменьшение значения амплитуды и постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока обеспечиваются увеличением значения соотношения  $R_{\text{экв}}/X_{\text{экв}}$ . Зависимость амплитуды аperiodической составляющей тока от фазы напряжения на силовых контактах выключателя носит экстремальный характер – включение выключателя вблизи максимума напряжения соответствует минимальному значению амплитуды аperiodической составляющей тока.

Целью моделирования одностороннего включения ЛЭП 750 кВ является определение оптимальных режимов работы с точки зрения допустимости величин аperiodической составляющей тока и времени отключения ЛЭП.

Расчетная схема электропередачи 750 кВ атомная электростанция 1 (АЭС1) – ПС – АЭС2 показана на рис. 2. Источником исходных данных является [10].

Моделирование режимов одностороннего включения воздушных линий электропередач 750 кВ выполнено в соответствии с методикой, изложенной в [11].

При моделировании ЛЭП 750 кВ АЭС1 – ПС и ЛЭП 750 кВ ПС – АЭС2 были математически представлены как линии с распределенными параметрами, определяемыми конструкцией фазы (таблица 1).

Исходя из конструкции фазы (информация приведена из паспортов линий), были определены погонные параметры ЛЭП (таблица 2).

Все шунтирующие реакторы (на рис. 2 – ШР1...ШР4) в схеме замещения прямой последовательности представлены ветвями с активным сопротивлением 6,08 Ом и реактивным сопротивлением 1876,9 Ом (реактор РОДЦ-110000/750), кроме реактора, установленного в фазе «А» на ПС, который введен ветвью с активным сопротивлением 3,47 Ом и реактивным сопротивлением 1876,9 Ом (реактор РОМБС-110000/750). Замена реактора типа РОДЦ на реактор типа РОМБС в фазе «А» связана с его непригодностью к дальнейшей эксплуатации, что уже происходило на ПС.

Эквивалентные генераторы электрических систем в схеме замещения представлены как источники напряжения, последовательно к которым подключены сопротивления. Значения сопротивлений обеспечивают распределение токов КЗ, приведенное в таблице 3.

Исследования режимов произведены с учетом самого сложного режима работы выключателя, при котором величина напряжения на его силовых контактах равна нулю, при этом диапазон изменения аperiodической составляющей тока при замыкании линии на холостой ход является максимальным.

Моделирование режимов КЗ производилось с условием, что в месте повреждения переходное сопротивление отсутствует, т.е. равно нулю.

Критерием эффективности предложенных решений по уменьшению влияния действия аperiodической составляющей тока выбрано условие перехода тока через свое нулевое значение через 40 мс после включения выключателя, установленного на ЛЭП. Максимальный интервал времени между соседними переходами не должен превышать 10 мс. Временная задержка 40 мс обусловлена временем действия основных защит типа НДЗ 750 (ПДЭ-2003), установленных на ЛЭП.

На рис. 3–6 приведены графики токов в фазе А контактов выключателя (содержание аperiodической составляющей в токах других фаз меньше), а в таблице 4 – промежутки времени от момента замыкания силовых контактов выключателя до начала устойчивого перехода фазного тока (фаза «А») через нуль и длительность затухания аperiodической составляющей при включении ЛЭП 750 кВ АЭС1 – ПС со стороны ПС на холостой ход для различных случаев включения реакторов на АЭС1 и ПС.

Аналогично произведены расчеты величины аperiodической составляющей при одностороннем включении ВЛ 750 кВ АЭС2 – ПС на холостой ход со стороны ПС для различных случаев включения реакторов на АЭС2 и ПС.

На рис. 7–9 приведены графики токов в фазе «А» выключателя (содержание аperiodической составляющей в токах других фаз меньше), а в таблице 5 – промежутки времени от момента замыкания контактов выключателя до начала устойчивого перехода фазного тока (фаза «А») через нуль и длительность затухания аperiodической составляющей при включении ЛЭП 750 кВ АЭС2 – ПС со стороны ПС на холостой ход для различных случаев включения реакторов на АЭС2 и ПС.

Анализ результатов моделирования одностороннего включения воздушных линий электропередач 750 кВ, содержащих значительную аperiodическую составляющую тока, на холостой ход позволяет сделать следующие выводы. Оптимальными с точки зрения допустимости

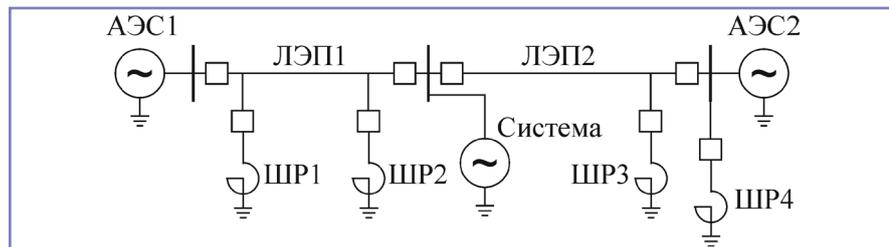


Рис. 2. Расчетная упрощенная схема электропередачи 750 кВ АЭС1 – ПС – АЭС2

Таблица 1. Конструкция фазы и длина воздушной линии электропередачи (ВЛ)

	ВЛ 750 кВ АЭС1 – ПС	ВЛ 750 кВ АЭС2 – ПС
Тип и количество проводов в фазе	5хАС 240/56	4хАС 500/27
Расстояние между проводами в фазе (мм)	300	600
Расстояние между фазами для опоры П 750-1(м)	18,5	18,5
Длина ВЛ	207	131,24

Таблица 2. Погонные параметры ВЛ

	ВЛ 750 кВ АЭС1 - ПС	ВЛ 750 кВ АЭС2 - ПС
Активное сопротивление; Ом/км	0,024	0,0145
Реактивное сопротивление; Ом/км	0,3045	0,2851
Емкостная проводимость; мкСм/км	3,6226	3,883

Таблица 3. Токи КЗ на шинах 750 кВ ПС

Подстанция	Ток КЗ, кА	
	Трёхфазное	Однофазное
ПС, шины 750 кВ, в том числе:		
ВЛ 750 кВ АЭС1 – ПС	12,574	12,297
АТ-5 ПС	4,630	2,671
АТ-6 ПС	1,285	2,811
ВЛ 750 кВ АЭС2 – ПС	1,252	2,691
	5,413	3,961

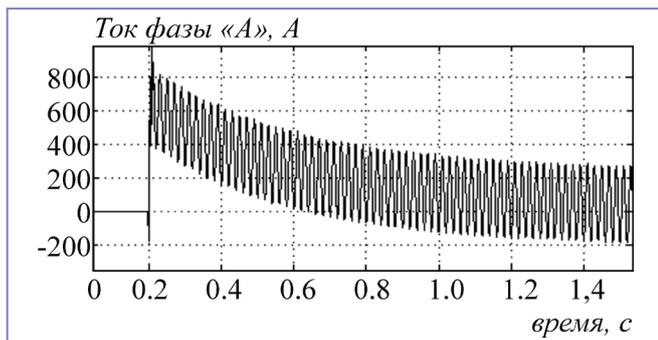


Рис. 3. Осциллограмма тока фазы «А», проходящего через силовые контакты выключателя, при включении ВЛ 750 кВ АЭС1-ПС (рис. 2) на холостой ход со стороны ПС при шунтирующих реакторах, введенных в работу на ПС и АЭС1

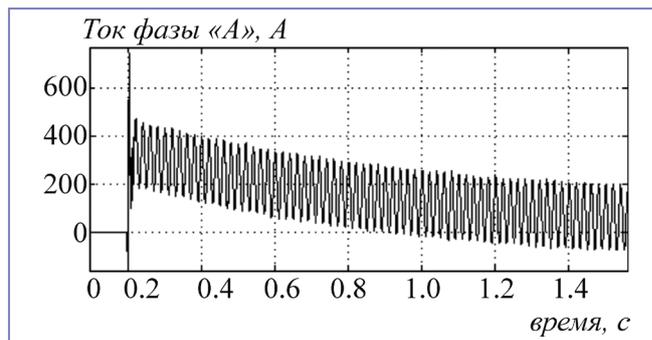


Рис. 4. Осциллограмма тока фазы «А», проходящего через силовые контакты выключателя, при включении ВЛ 750 кВ АЭС1-ПС (рис. 2) на холостой ход со стороны ПС при выведенном из работы шунтирующем реакторе на АЭС1

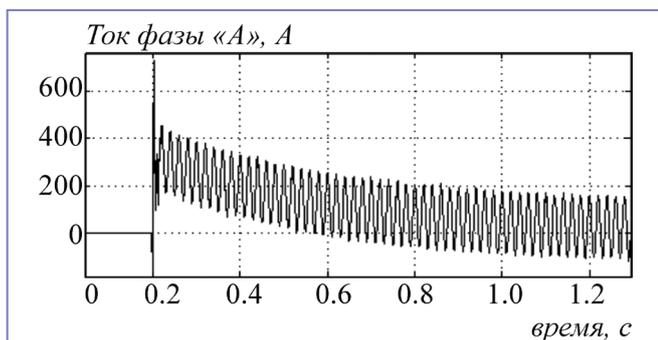


Рис. 5. Осциллограмма тока фазы «А», проходящего через силовые контакты выключателя, при включении ВЛ 750 кВ АЭС1-ПС (рис. 2) на холостой ход со стороны ПС при выведенном из работы реакторе на ПС

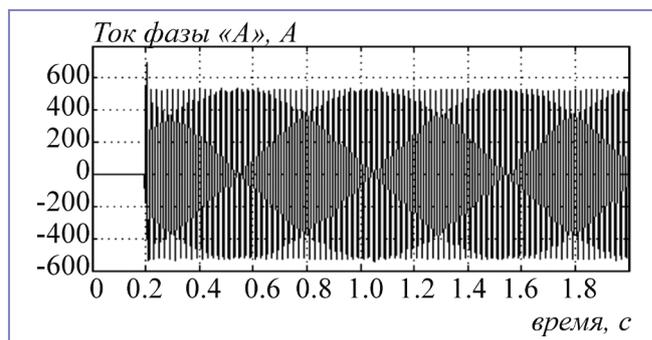


Рис. 6. Осциллограмма тока фазы «А», проходящего через силовые контакты выключателя, при включении ВЛ 750 кВ АЭС1-ПС (рис. 2) на холостой ход со стороны ПС при выведенных из работы шунтирующих реакторах на двух концах ЛЭП

быстрого отключения ЛЭП (при ложном срабатывании основных быстродействующих защит типа НДЗ 750 (ПДЭ-2003), работающей в режиме холостого хода, т.е. не замкнутой в транзит, при подаче напряжения на нее со стороны ПС (т.е. с наименьшим током КЗ), являются режимы: с отключенными реакторами на ПС и АЭС1 (АЭС2) (последние строки таблиц 4 и 5) или с отключенным реактором на АЭС2 (вторая строка таблицы 5). Длительность затухания аperiodической составляющей тока, протекающего через силовые контакты выключателя, в этих режимах меньше на два порядка по отношению к длительности в других режимах. Таким образом, можно осуществить эффективное уменьшение аperiodической составляющей тока за

счет отключения шунтирующих реакторов на время холостого хода линии при её плановом опробовании с последующим восстановлении транзита и подключении

реакторов без применения дополнительных устройств (предвключаемых резисторов, устройств синхронной коммутации и т.д.).

Таблица 4. Период между замыканием силовых контактов выключателя и началом устойчивого перехода тока фазы «А» через нулевое значение и длительность затухания аperiodической составляющей при включении ЛЭП 750 кВ АЭС1 – ПС со стороны ПС на холостой ход

Наличие шунтирующего реактора	Период между замыканием силовых контактов выключателя и началом устойчивого перехода тока фазы «А» через нулевое значение, с	Длительность затухания аperiodической составляющей тока, с
Реакторы на ПС и АЭС1 в работе	0,50	2,57
Реактор отключен на АЭС1	0,80	3,77
Реактор отключен на ПС	0,44	2,25
Реакторы на ПС и АЭС1 отключены	< 0,03	< 0,03

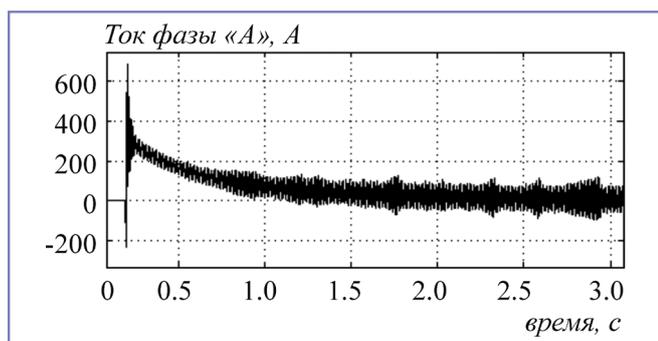


Рис. 7. Осциллограмма тока фазы «А», проходящего через силовые контакты выключателя, при включении ВЛ 750 кВ АЭС2-ПС (рис. 2) со стороны ПС при шунтирующих реакторах, введенных в работу на ПС и АЭС2

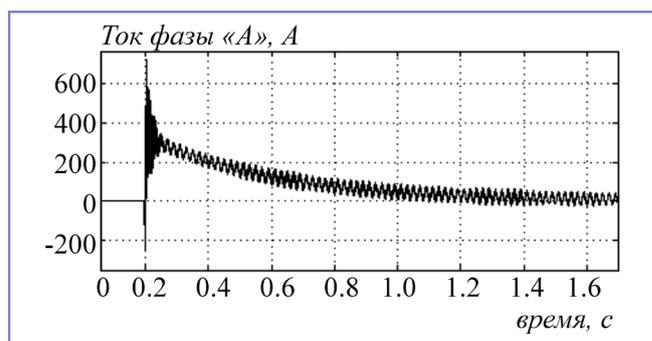


Рис. 8. Осциллограмма тока фазы «А», проходящего через силовые контакты выключателя, при включении ВЛ 750 кВ АЭС2-ПС (рис. 2) со стороны ПС при выведенном из работы шунтирующем реакторе на ПС

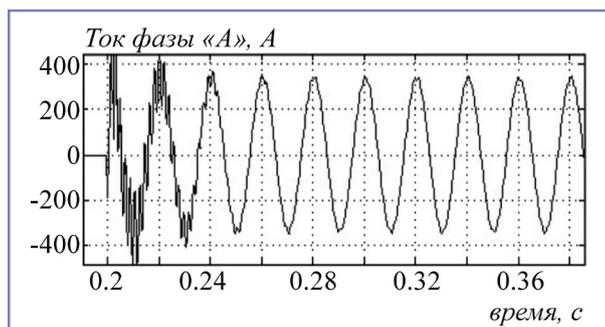


Рис. 9. Осциллограмма тока фазы «А», проходящего через силовые контакты выключателя, при включении ВЛ 750 кВ АЭС2 – ПС (рис. 2) со стороны ПС при выведенном из работы шунтирующем реакторе на АЭС2

## Литература

1. Стороженко Е.А. Снижение влияния аperiodической составляющей тока элегазового выключателя ВЛ 220–500 кВ на процесс коммутации в послеаварийных режимах / Е.А. Стороженко, В.А. Осипов // Инженерный вестник Дона, № 2–2018.
2. Дмитриев М.В. Элегазовые выключатели 110–750 кВ Методика выбора мероприятий по борьбе с аperiodическими токами / М.В. Дмитриев // Новости электротехники, № 5. – 2012.
3. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели / Г.А. Евдокунин [и др.] // Новости электротехники, № 3. – 2012. – С. 2–6.
4. ГОСТ 1516.3–96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции: Межгос. стандарт. – Введен 01.01.1999. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 50 с.
5. ГОСТ 12450–82. Выключатели переменного тока на номинальные напряжения от 110 до 750 кВ. Технические требования к отключению ненагруженных воздушных линий и методы испытаний.
6. ГОСТ Р 52565–2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. Издание официальное. – Москва: Стандартинформ, 2007.
7. Kasztenny, B. Circuit breaker ratings – A primer for protection engineers / B. Kasztenny, J. Rostron // 2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)
8. Исследование и анализ переходных режимов в целях повышения надежности работы элегазовых выключателей линий электропередачи сверхвысокого напряжения / А.Ю. Мурзин [и др.] // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро-технологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – С. 195–203.
9. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети / Г.А. Евдокунин. – СПб: Синтез Бук, 2011. – 286 с.
10. Справочник по проектированию электрических сетей. Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.
11. Приложение 1 к распоряжению ОАО «ФСК ЕЭС» от 10.12.2012 № 838р. Методика расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами.

### Марикин Александр Николаевич

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

рожного 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 – 38 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС. Имеет более 50 научных трудов, более 5 патентов на изобретения.

### 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 и качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах с нелинейными элементами». Опыт работы – 26 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС. Имеет 116 печатных трудов, в том числе 15 патентов на изобретения.

### Морозов Сергей Владимирович

Родился в 1977 году. В 1999 году окончил Брянскую государственную инженерно-технологическую академию по специальности «Машины и механизмы лесного комплекса», в 2013 году – Московский энергетический институт по специальности «Электроэнергетические системы и сети». Кандидат технических наук. В 2003 году защитил диссертацию по теме «Повышение износостойкости и долговечности литых деталей и инструмента за счет использования новых легированных Fe-C сплавов». Опыт работы – 17 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета. Имеет 12 научных трудов, 2 патента.

### Пугачев Александр Анатольевич

В 2006 году окончил Брянский государственный технический университет. Доктор технических наук, доцент. В 2020 году защитил диссертацию по теме «Энергоэффективные электроприводы с асинхронными двигателями для магистральных локомотивов». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета. Имеет свыше 100 научных трудов, 30 патентов.

Таблица 5. Период между замыканием силовых контактов выключателя и устойчивого перехода тока фазы «А» через нулевое значение и длительность затухания аperiodической составляющей при включении ЛЭП 750 кВ АЭС2 – ПС со стороны ПС на холостой ход

Наличие шунтирующего реактора	Период между замыканием силовых контактов выключателя и началом устойчивого перехода тока фазы «А» через нулевое значение, с	Длительность затухания аperiodической составляющей тока, с
Реакторы на ПС и АЭС2 в работе	1,08	3,4
Реактор отключен на АЭС2	< 0,03	0,05
Реактор отключен на ПС	0,95	2,5
Реакторы на ПС и АЭС2 отключены	< 0,03	< 0,03

### 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 38 years. At present he works as a professor at the Department of power supply of railways of PGUPS. He has more than 50 scientific papers, more than 5 patents for inventions.

### 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 26 years. At present he works as a chairman at the Department of power supply of railways of PGUPS. He has 116 printed works, including 15 patents for inventions.

### Morozov Sergey

Was born in 1977. In 1999, he graduated from the Bryansk State Engineering and Technological Academy with a degree in "Machines and Mechanisms of the Forestry Complex", in 2013 – from the Moscow Power Engineering Institute with a degree in "Electrical Power Systems and Networks". Candidate of Engineering sciences. In 2003 he defended thesis on "Improving the wear resistance and durability of cast parts and tools through the use of new alloyed Fe-C alloys." Work experience – 17 years. Currently he is an associate professor of the Department of "Industrial Electronics and Electrical Engineering" at the Bryansk State Technical University. He has 12 scientific works, 2 patents.

### Pugachev Alexander

In 2006 he graduated from Bryanskiy State Technical University. He is a doctor of Engineering Science, associated professor. In 2020 he defended a thesis on the topic "Energy efficient electric drivers with asynchronous motors for the mainline locomotives". Work experience is 15 years. At present he works as the head of the department "Industrial electronics and electrical engineering" in Bryanskiy State Technical University. He has more than 100 scientific works, 30 patents.

# Методика выбора параметров системы автоматического управления скоростью движения тяжеловесного грузового поезда

// Methodology for choosing parameters of the automatic control system for the speed of a heavy freight train //

Пудовиков О. Е., д.т.н., доцент,  
Гречишников В. А., д.т.н., доцент,  
РУТ (МИИТ), Москва

Бурков А. Т., д.т.н., профессор,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

Рассмотрена методика выбора параметров систем автоматического управления грузовых тяжеловесных поездов, учитывающая особенности динамических процессов, возникающих при переходных режимах движения. Для реализации методики выбрана система критериев, позволяющих оценить протекание переходных процессов в поезде, а также предложен метод свёртки разнородных критериев качества для перехода от многокритериальной задачи оптимизации к однокритериальной. Предлагаемая методика применена к системе автоматического управления скоростью движения длинносоставного грузового поезда. Полученные по результатам исследования параметры системы позволили значительно повысить качество управления скоростью в результате уменьшения амплитуды продольных динамических сил и величины накопленных усталостных повреждений в упряжных приборах вагонов и локомотивов, а это, в свою очередь, снижает вероятность разрушения автосцепок из-за внезапных или постепенных их отказов.

**Ключевые слова:** тяжеловесный грузовой поезд, продольная сила, автоматическое управление скоростью, качество управления, параметрический синтез, оптимальное управление.

Одним из способов повышения провозной способности железных дорог, не требующих значительных капитальных затрат на модернизацию их инфраструктуры, является внедрение в обращение и широкое использование поездов повышенной массы и длины. Однако в таких поездах возникают продольные колебания со значительной амплитудой сил. Дополнительными негативными факторами, сказывающимися на величинах этих сил, являются возможные

*The paper considers the methodology for choosing the parameters of automatic control systems for heavy freight trains, taking into account the peculiarities of dynamic processes that arise during transient modes of movement. To implement the methodology, a system of criteria has been selected that allows one to assess the course of transient processes in a train, and a method of convolution of heterogeneous quality criteria for the transition from a multi-criteria optimization problem to a single-criteria one is proposed. The proposed method is applied to the system of automatic control of the speed of movement of a long-piece freight train. The parameters of the system obtained from the results of the study made it possible to significantly improve the quality of speed control as a result of a decrease in the amplitude of longitudinal dynamic forces and the magnitude of accumulated fatigue damage in the harness devices of cars and locomotives, and this, in turn, reduces the likelihood of destruction of automatic couplings due to their sudden or gradual failures.*  
**Keywords:** heavy freight train, longitudinal force, automatic speed control, control quality, parametric synthesis, optimal control.

ошибки, возникающие при выполнении технологических операций по управлению поездом, в результате которых величины продольных динамических сил могут существенно превысить значение, установленное по условиям статической и усталостной прочности для автосцепок и поглощающих аппаратов подвижного состава. Вследствие этого возрастает вероятность возникновения внезапных и постепенных отказов, заключающихся в разрушении упряжных

приборов вагонов и, следовательно, разрыве поезда. Последнее является серьёзным нарушением безопасности движения, ведущим к значительным материальным потерям, а в некоторых случаях и к человеческим жертвам [1]. Дополнительным фактором опасности, действующим в тяжеловесных поездах при движении по участкам с тяжёлым профилем пути, является возможное появление условий, способствующих потере устойчивости вагонов в рельсовой колее (выдёргивание или выжимание) [2].

Большим вопросом при повышении провозной способности электрифицированных железных дорог за счёт использования поездов повышенной массы является безопасное использование системы тягового электроснабжения. Концентрированная электроэнергетическая нагрузка, усугубленная ошибками управления тяжеловесным составом, может привести к частым ложным срабатываниям релейных защит, возникновению ударных токов в электрооборудовании, существенному снижению его остаточного ресурса или мгновенному выходу из строя.

Повышение безопасности движения поездов, в том числе и грузовых, минимизация вредных воздействий частой смены режимов ведения поезда на систему тягового электроснабжения может осуществляться за счёт применения средств автоматизации управления скоростью движения. На железнодорожном транспорте находят применения системы автоматического ведения поездов, в том числе, построенные по многоконтурному принципу [3]. В таких системах внешним является контур управления временем хода, определяющий траекторию движения поезда, выходной координатой которого является режим движения поезда и величина заданной скорости. Внутренним, подчинённым контуром, является система автоматического управления скоростью движения, исполняющая задание контура времени хода. Выходной координатой системы автоматического управления скоростью является задание для системы параметров управления тяговыми или тормозными средствами локомотива [3]. Система автоматического управления скоростью движения должна обеспечивать требуемое качество управления, в том числе с учётом специфических критериев, позволяющих учитывать особенности динамических процессов, возникающих в поезде при

переходных режимах движения, а также величины квазистатических продольных сил, непосредственно влияющих на устойчивость вагонов.

### Материалы и методы

Поезд представляет собой сложную, многомассовую механическую систему, состоящую из нескольких десятков (а иногда и сотен) взаимодействующих между собой экипажей (локомотивов и вагонов) с нелинейными и не поддающимся линеаризации связями между ними. В процессе движения на разные экипажи в составе одного поезда действуют различные по величине и направлению внешние силы, представляющие собой равнодействующие силы сопротивления движению, составляющих силы тяги или торможения, а также реакций в межвагонных соединениях. Всё это приводит к возникновению продольных колебаний в поезде [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Для выполнения анализа динамических процессов, протекающих в поезде, в наибольшей степени подходят модели, рассматривающие поезд как систему твёрдых тел, или «дискретные» модели поезда [5, 6, 7, 8, 9, 10].

При построении такой модели поезд необходимо представить в виде цепочки из масс вагонов и локомотивов, соединенных связями. Каждая масса дискретной модели совершает движение под действием передаваемых на нее усилий от упругих или упруговязких связей, а также внешних сил. Представляя поезд таким способом, считают каждый вагон абсолютно твёрдым телом определённой массы, а каждую межвагонную связь – телом без массы. Подобное представление поезда позволяет учесть зазоры в механизмах поглощающих аппаратов и автосцепок, значительно влияющих на распространение возмущений вдоль состава поезда и величину возникающих сил.

С учётом сделанных допущений, движение каждого экипажа поезда описывается следующей системой дифференциальных уравнений [6]:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{S_i - S_{i+1} + F_i}{m_i}, i = 1, \dots, n; S_{n+1} = 0; \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, i = 2, \dots, n; \\ \dot{x}_1 = v_1 = -\dot{q}_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – число экипажей в поезде;  $q_i$  – деформация  $i$ -го межвагонного соединения;  $\dot{q}_i$  – скорость деформации;  $m_i$  – масса  $i$ -го экипажа;  $v_i$  – скорость центра масс экипажа;  $S_i$  – реакция в  $i$ -ом межвагонном соединении;  $F_i$  – суммарная внешняя сила, действующая на  $i$ -й экипаж.

Суммарной внешней силой  $F_i$ , действующей на  $i$ -й экипаж, является результирующая от силы тяги  $F_{ki}$ , силы торможения (электрического  $B_{эл i}$  и пневматического  $B_{пн i}$ ), сил основного  $W_{oi}$  и дополнительного  $W_{di}$  сопротивления движению поезда:

$$F_i = F_{ki} - B_{эл i} - B_{пн i} - W_{oi} - W_{di}. \quad (2)$$

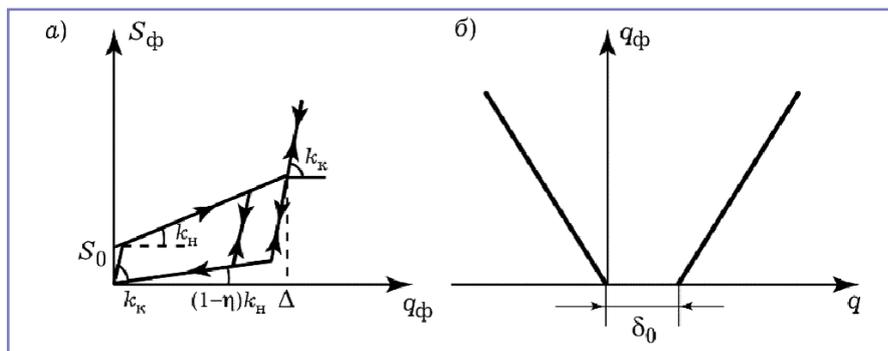


Рис. 1. Зависимость силы от деформации междувагонного соединения (а) и деформаций междувагонного соединения от относительного перемещения центров масс соседних экипажей (б):  $k_{\kappa}$  – жёсткость на ветви нагружения;  $k_{\kappa}$  – жёсткость кузова;  $\eta$  – коэффициент, характеризующий рассеивания энергии в аппарате,  $\Delta$  – ход поглощающего аппарата,  $S_0$  – величина начальной затяжки (преднатяга),  $\delta_0$  – зазор в сцепном устройстве.

При выполнении расчётов принято, что в качестве межвагонной связи выступает пружинно-фрикционный поглощающий аппарат со статической характеристикой, представленной на рис. 1.

Величина деформации  $i$ -го межвагонного соединения определяется следующим образом:

$$q_i = x_i + x_{i-1} - \frac{l_{i-1} + l_i}{2},$$

где  $x_i$  – координата (вдоль траектории) положения центра масс  $i$ -го экипажа;  $l_i$  – длина экипажа.

Для создания сил тяги  $F_{ki}$  или электрического торможения  $B_{эл i}$  локомотива, действующих на поезд, служит тяговый электропривод. При квазинепрерывном способе управления тягой, присутщем электроприводе с коллекторными двигателями постоянного тока и системой плавного регулирования напряжения на их зажимах или с бесколлекторными тяговыми двигателями переменного тока (синхронными или асинхронными) используется система автоматического управления. Быстродействие этой системы определяется скоростью протекания переходных процессов в силовых электрических цепях локомотива и составляет доли секунды, что на несколько порядков меньше, чем величина постоянной времени линеаризованной модели поезда, достигающей нескольких тысяч секунд [11].

Длинносоставный поезд располагается на нескольких элементах профиля пути с различной крутизной, радиусом кривых, подуклонкой рельсов. Эта особенность оказывает существенное влияние на протекание переходных процессов в поезде и на величины динамических и квазистатических сил в нём. Поэтому при решении задач, связанных с исследованием продольной динамики, силы сопротивления движению необходимо определять отдельно для каждого экипажа, локомотива или вагона. Величина силы удельного сопротивления движению нелинейно зависит от скорости [12] и в общем случае может быть вычислена в соответствии со следующим выражением:

$$W_{oi} = a_0 + \frac{a_1 + a_2 v + a_3 v^2}{q_0}.$$

Здесь  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты, зависящие от особенностей подвижного состава и конструкции пути,  $q_0$  – вес, приходящийся на одну ось.

Учёт составляющей дополнительного сопротивления движению от кривых участков пути выполнен по методике, в соответствии с которой учёт сопротивления движению от кривых участков пути производится путём замены их эквивалентными подъёмами.

Для оценки качества управления скоростью движения грузового поезда использована следующая система критериев:

- время протекания переходного процесса  $t_p$ ;
- величина  $F_{max}$  наибольшей продольной силы при относительно редком сочетании экстремальных нагрузок. В эксплуатации для грузовых вагонов ему соответствуют осаживание и трогание с места тяжеловесного состава, соударения при выполнении маневровых операций, а также экстренное торможение при малых скоростях движения. Данная величина принимается исходя из условия недопущения появления остаточных деформаций (повреждений) в узлах или деталях вагонов, а также возникновения внезапного отказа, связанного с их возможным разрушением [13];
- величина  $a$  суммы накопленных усталостных повреждений от действия переменных по величине, «умеренных» нагрузений, возникающих в нормальных эксплуатационных режимах – движении с допустимой скоростью по прямым и кривым участкам пути, по стрелочным переводам и т.п. При выполнении расчётов принята линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений, предполагающая, что усталостное разрушение наступает при выполнении условия:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1,$$

где  $N_i$  – количество циклов до разрушения детали при амплитуде  $\sigma_{ai}$ , определяемое по кривой усталости,  $n_i$  – количество циклов действия амплитуды  $\sigma_{ai}$ . С учётом возможного в эксплуатации эксцентриситета при приложении силы из-за несоосности автосцепок

принято, что величина приложенной в автосцепке силы, вызывающей напряжения, при которых начинается накопление усталостных повреждений, составляет 35 кН [13].

**Результаты и обсуждение**

На рис. 2 представлены график переходных процессов, происходящих в поезде при реализации заданного режима движения с использованием системы автоматического управления скоростью [14] с параметрами, найденными путём выполнения пробных расчётов. Исследовалось движение поезда массой 6049 тонн, состоящего из электровагона и 69 вагонов по 85 тонн. Как видно, в начальный момент времени сила тяги  $F_k(t)$  начинает плавно увеличиваться (рис. 2б), обеспечивая трогание поезда с места и его разгон. Процесс трогания с места сопровождается колебаниями сил, действующих в соединениях между электровагоном и первым вагоном  $F_{1-2}(t)$  (рис. 2б), а также в серединах первой трети поезда  $F_I(t)$ , второй  $F_{II}(t)$  и последней трети  $F_{III}(t)$  поезда (рис. 2в) с частотой примерно 3,5 Гц, что вызвано поочерёдностью приведения в движение вагонов поезда. Величины амплитуд колебаний продольных сил при этом достигают 470 кН. После приведения в движение всех вагонов поезда в нём возникают колебания с частотой порядка 0,2 Гц, которые вызваны распространением прямой и обратной волн растяжения/сжатия (рис. 2б и 2в).

В момент времени  $t = 80$  с при скорости 17 км/ч система переводится в режим выбега, что сопровождается уменьшением до нуля силы тяги и сил, действующих в сечениях вагонов поезда.

Движение на выбеге сопровождается набеганием вагонов, расположенных в хвостовой части поезда, на локомотив, что проявляется на графиках в виде отрицательных величин продольных сил (рис. 2б и 2в). Затем, в момент времени  $t = 143$  с, повторно включается режим тяги, обеспечивая разгон поезда до скорости 40 км/ч. По мере того, как величина фактической скорости движения поезда  $v(t)$  приближается к заданному значению, сила тяги уменьшается до уровня, необходимого для поддержания требуемой скорости движения.

Ниже приведены найденные в результате моделирования системы автоматического управления величины частных критериев качества

$$t_p = 287,3 \text{ с}; a = 3,898 \cdot 10^{-7}; F_{max} = 540 \text{ кН.}$$

Используемый векторный критерий качества состоит из разнородных частных критериев, т.е. для получения наилучших их значений к системе управления скоростью должны предъявляться различные требования, поэтому отыскание параметров автоматического управления, удовлетворяющих всем критериям одновременно, не представляется возможным. Для преодоления данного затруднения выполним сведение исходной задачи многокритериальной

оптимизации к однокритериальной, для чего используем обобщённый критерий оптимальности (целевую функцию). Для выполнения данного перехода воспользуемся критерием, формируемым на основе отклонения частных критериев от «идеальной» альтернативы – критерием суммарных потерь [15, 16]:

$$Ц = \sqrt{\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \left( \frac{U_i - U_i^*}{U_i^* - U_i^{**}} \right)^2},$$

где  $U_i^*$  – минимальное значение  $i$ -го критерия, получаемое при решении задачи однокритериальной оптимизации по этому  $i$ -му критерию;  $U_i^{**}$  – максимальное или допустимое значение  $i$ -го критерия;  $z$  – количество частных критериев оптимизации.

Минимизация целевой функции предполагает поочерёдное отыскание минимумов

значений частных критериев, после чего с использованием найденных минимальных значений выполняется минимизация самой целевой функции. Для минимизации как частных критериев, так и целевой функции, использован метод деформируемого многогранника Нелдера-Мида [17]. В результате решения задачи параметрического синтеза системы автоматического управления скоростью, были найдены параметры системы и повторно выполнено моделирование работы системы автоматического управления скоростью.

Результаты моделирования для поезда весом 6049 тонн, сформированного по рассмотренному ранее варианту, приведены на рис. 3. Как видно, характер протекания переходных процессов в поезде при использовании вычисленных параметров регулятора значительно улучшился по сравнению со

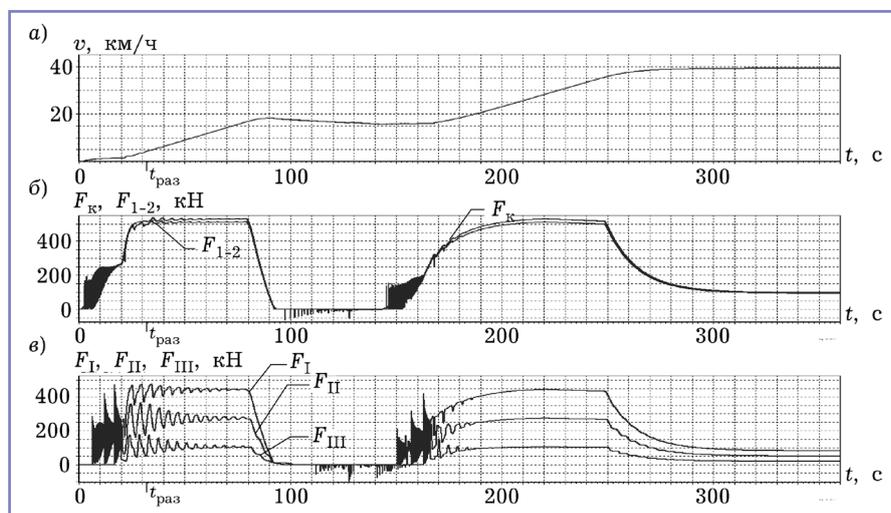


Рис. 2. Результаты моделирования работы системы автоматического управления скоростью с параметрами, найденными в результате выполнения пробных расчётов: а – скорость движения поезда; б – сила тяги локомотива  $F_k(t)$  и сила  $F_{1-2}(t)$ , действующая в соединении между локомотивом и первым вагоном; в – силы, действующие в серединах первой  $F_I(t)$ , второй  $F_{II}(t)$  и последней  $F_{III}(t)$  трети поезда

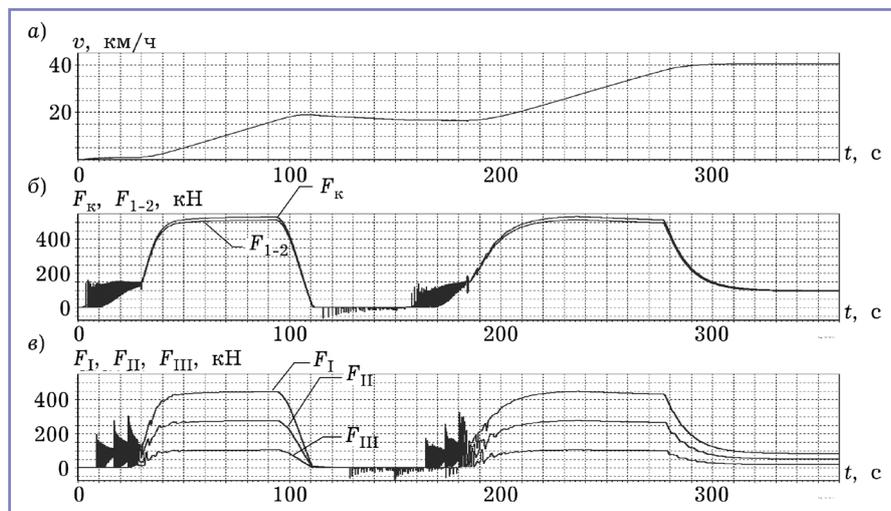


Рис. 3. Результаты моделирования работы системы автоматического управления скоростью с параметрами, найденными в результате решения задачи параметрического синтеза: а – скорость движения поезда; б – сила тяги локомотива  $F_k(t)$  и сила  $F_{1-2}(t)$ , действующая в соединении между локомотивом и первым вагоном; в – силы, действующие в серединах первой  $F_I(t)$ , второй  $F_{II}(t)$  и последней  $F_{III}(t)$  трети поезда

случае использования параметров, найденных в результате пробных расчётов.

Так, в поезде отсутствуют низкочастотные колебания, вызванные распространением вдоль него волны растяжения/сжатия, также значительно сократились амплитуды высокочастотных колебаний (с 450 кН до 300 кН), возникающих при переходе из сжатого в растянутое состояние, и наоборот. Величины показателей качества при этом составили:

$$t_p = 292,5 \text{ с}; a = 7,889 \cdot 10^{-8}; F_{max} = 516 \text{ кН},$$

т.е. время регулирования  $t_p$  незначительно возросло (на 5,2 с), сумма накопленных усталостных повреждений  $a$  сократилась в 4,9 раза, величина наибольшей продольной динамической силы  $F_{max}$  также уменьшилась на 24 кН.

### Выводы

Отыскание параметров системы автоматического управления скоростью движения с использованием методов многокритериальной оптимизации на основе предлагаемых критериев качества управления позволяет обеспечить требуемое качество управления скоростью движения, уменьшив величины продольных сил, действующих в поезде при переходных режимах движения, а также улучшив характер протекания переходных процессов в нём, в результате чего уменьшается сумма накопленных усталостных повреждений в автосцепках локомотивов и вагонов. Следствием этого является повышение безопасности движения тяжёловесных грузовых поездов, что способствует в итоге повышению провозной способности железных дорог.

### Литература

1. Пудовиков О.Е. Автоматическое управление скоростью движения длинносоставного грузового поезда // О.Е. Пудовиков // Мехатроника. Автоматизация. Управление. № 8, 2010, с. 51–57.
2. Pudovikov, O.E. Systems for Automatic Control of Locomotive Speed of a Freight Train with Distributed Traction // O.E. Pudovikov, V.G. Sidorenko, N.N. Sidorova, M.D. Kiselev, Russian Electrical Engineering, 2019, vol. 90, № 9653–660.
3. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимум; Под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
4. Лазарян, В.А. Динамика вагонов – устойчивость движения и колебания. М.: Трансжелдориздат, 1964. 255 с.
5. Dynamics of Railway vehicle systems // Vijay K. Garg, Rao, V. Dukkipati // Academic press, 1984.
6. Блохин, Е.П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания). / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
7. Динамика вагона: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. Изд. 2-е, перераб. и доп. / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, И.И. Чесноков – М.: Транспорт, 1978. – 352 с.
8. Нестационарные режимы тяги (Тяговое обеспечение перевозочного процесса) / Лисицын А.Л., Мугинштейн Л.А. / Под ред. Г.И. Нарских, И.К. Петушковой. – М.: Интекст, 1996. – 159 с.
9. Wu, Q., Luo, S. & Cole, C. Longitudinal dynamics and energy analysis for heavy haul trains. J. Mod. Transport. 22, 127–136 (2014). <https://doi.org/10.1007/s40534-014-0055-x>
10. McClanachan M, Cole C. Current train control optimization methods with a view for application in heavy haul railways. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2012; 226(1): 36–47. doi:10.1177/0954409711406352
11. Баранов, Л.А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой // Л.А. Баранов. – Вестник МИИТ. Вып. 10. – 2004. – С. 3–16
12. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. – М.: Транспорт. – 1983. – 328 с.
13. Баранов, Л.А. Критерии качества регулирования скорости поезда / Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков / Мир транспорта. – 2009. – № 4. – С. 50–56.
14. Пудовиков, О.Е. Управление длинносоставными тяжёловесными грузовыми поездами // О.Е. Пудовиков // Электронное научное периодическое издание «Управление большими системами» Выпуск 29 Гос. рег. номер 0421000023\0024. – ИПУ РАН, 2010. – С. 214–231.
15. Дехтяренко В.А., Святыхцкий Д.А. Методы многокритериальной оптимизации сложных систем при проектировании. – Киев, изд-во АН УССР: 1976. – 41 с.
16. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
17. Himmelblau, David Applied nonlinear programming // David M. Himmelblau // McGraw-Hill Book Company, 1972.

#### **Пудовиков Олег Евгеньевич**

Родился в 1974 году. В 1997 году окончил МИИТ по специальности «Локомотивы». Доктор технических наук, доцент. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения». Опыт работы – 21 год. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ). Имеет 89 научных статей, 7 патентов на изобретение, полезную модель и регистрацию программного обеспечения.

#### **Гречишников Виктор Александрович**

Родился в 1974 году. В 1997 году окончил МИИТ по специальности «Электроснабжение железнодорожного транспорта». Доктор технических наук, доцент. В 2014 году защитил диссертацию по теме «Измерительно-аналитическая программно-аппаратная система защиты и диагностики основного оборудования тяговых подстанций постоянного тока». Опыт

работы – 25 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроэнергетика транспорта», первым заместителем директора – начальником учебного отдела института транспортной техники и систем управления РУТ (МИИТ). Имеет 65 научных статей, 10 патентов на изобретение, полезную модель и регистрацию программного обеспечения.

#### **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. В 1982 году защитил диссертацию по теме «Управление электро-энергетическими процессами локомотивов с асинхронным приводом». Опыт работы – 61 год. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС. Автор 160 научных трудов, 20 патентов. Имеет 6 правительственных и 5 отраслевых наград.

#### **Pudovikov Oleg**

Was born in 1974. In 1997 he graduated from MIIT with a degree in Locomotives. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. In 2011 he defended his thesis on the topic “Automatic speed control of a freight train with an electric locomotive, allowing smooth control of traction and braking forces”. Work experience is 20 years. At present he works as the head of the department “Electric Trains and Locomotives” of RUT (MIIT). He has 89 works, 7 patents for invention, utility model and certificates of registration of computer programs.

#### **Grechishnikov Viktor**

Was born in 1974. In 1997 he graduated from MIIT with a degree in “Electricity supply by railway traffic transport”. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. In 2014 he defended his dissertation on the topic “Measuring and analytical software and hardware system for protection and diagnostics of the main equipment of DC traction substations”. Work experience – 25 years. Currently, he works as a professor of the Department of “Electric Power Engineering of Transport”, First Deputy Director-head of the educational department of the Institute of Transport Technology and Control Systems of the Russian Academy of Sciences (MIIT). He has 65 scientific articles, 10 patents for inventions, utility models and software registration.

#### **Burkov Anatoly**

Was born in 1933. In 1958 he graduated from the Tomsk Electromechanical Institute of Railway Transport Engineers with a degree in “Electricity supply of railway transport”. Doctor of Technical Sciences, Professor. In 1982 he defended his dissertation on the topic “Control of electric power processes of locomotives with asynchronous drive”. Work experience – 61 years. Currently, he works as a professor at the Department of “Electric Power Supply of Railways” of PSUPS. Author of 160 scientific papers, 20 patents. He has 6 government and 5 industry awards.

# Использование кинетического накопителя электрической энергии в системе автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава

// Research of the possibility of construction of the system of automatic voltage stabilization of the traction network of the electric rolling stock //

Шаряков В. А., к. т. н., доцент,  
АО «НПП «ЭПРО», Санкт-Петербург

Шарякова О. Л., к. т. н., доцент,  
СПбГАСУ, Санкт-Петербург

Макарова Е. И., д. т. н., профессор,  
Марков К. В.,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Рост интенсивности движения грузовых и высокоскоростных электроподвижных составов, повышение скорости сообщения, необходимость в обеспечении увеличения пропускной способности железнодорожных магистралей оказывает существенное влияние на контактную сеть 3,3 кВ постоянного тока, вызывая провалы, всплески напряжения и увеличение тяговых токов в 1,25–1,5 раза от их номинального значения. В работе рассматривается возможность компенсации перенапряжений и провалов напряжения на участке контактной сети за счет применения стабилизатора напряжения, использующего энергию, накопленную в кинетическом накопителе электрической энергии. На основе предложенных в работе формул построена математическая модель. Основным преимуществом примененной модели является использование реальных данных, полученных во время движения существующего электрического подвижного состава. Результаты работы показывают возможность коррекции напряжения контактной сети 3,3 кВ постоянного тока в зависимости от характера возникновения перенапряжений и провалов при использовании стабилизатора напряжения, использующего энергию, запасенную в кинетическом накопителе электрической энергии.*  
**Ключевые слова:** система стабилизации напряжения контактной сети, электрический подвижной состав, высокоскоростной электроподвижной состав, городской электротранспорт, тяговый электропривод, рекуперативное торможение, кинетический накопитель энергии, математическое моделирование, неравномерность энергопотребления.

*An increase in the intensity of movement of electric rolling stock, an increase in the speed of communication, along with obtaining the necessary dynamic characteristics and the widespread use of modern transistor traction converters, has a significant impact on the contact network, causing dips and voltage surges. The paper considers the possibility of voltage stabilization on a section of the contact network due to the use of an automatic voltage stabilizer that uses energy stored in an electric energy storage device. As a voltage stabilizer, a reversible transistor converter is used in the work, which acts as a charging and discharging device for an electric energy storage. A mathematical model is constructed on the basis of the formulas proposed in the work. 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. The research results show the possibility of reducing the influence of modern rolling stock on the voltage of the contact network when using a voltage stabilizer that uses energy stored in an electric energy storage device.*  
**Keywords:** contact network voltage stabilization system, electric rolling stock, high-speed electric rolling stock, urban electric transport, traction electric drive, regenerative braking, kinetic energy storage, mathematical modeling, uneven energy consumption.

Современный электрический подвижной состав (ЭПС) из-за использования транзисторных систем тягового привода по сравнению с ЭПС, оснащенным резисторно-контакторными системами управления тяговыми двигателями, обладает лучшими динамическими характеристиками и позволяет применять рекуперативное торможение [1].

Отметим, ЭПС негативно влияет на напряжение в контактной сети (КС), вызывая кратковременные провалы и перенапряжения, особенно на участках, удаленных от тяговых подстанций. Во время включения в ходовые режимы на удаленных участках КС наблюдаются провалы в напряжении, а при выключении ходового режима – импульсные перенапряжения [2]. При рекуперативном торможении происходит переток энергии по КС, что приводит к возникновению дополнительной нагрузки, а при отсутствии потребителей электрической энергии или недостаточном ее потреблении, происходит продолжительное увеличение напряжения (рис. 1).

Вопросам стабилизации электрической энергии уделялось много внимания [3, 4, 5], однако, в основном технические решения рассматривались к применению на тяговой подстанции (ТП), а значит эффект от внедрения таких решений проявляется в непосредственной близости от тяговых подстанций, уменьшаясь по мере удаления от них и практически никак не препятствуя перетеканию энергии по контактной сети на значительные расстояния от рекуперированного ПС к потребляющему.

В работе [6] предлагается для компенсации перенапряжений и провалов напряжения на участке контактной сети применить стабилизатор напряжения, использующий накопитель электрической энергии, который при появлении перенапряжений заряжался, и тем самым задерживал или уменьшал рост напряжения, а при возникновении провалов в напряжении контактной сети, разряжаясь, компенсировал снижение напряжения (рис. 2).

Использование стабилизаторов напряжения на базе емкостных накопителей [6] допустимо для коррекции напряжения в сети городского электротранспорта, но из-за больших значений напряжений будет затруднительно в применении для контактной сети 3,3 кВ постоянного тока.

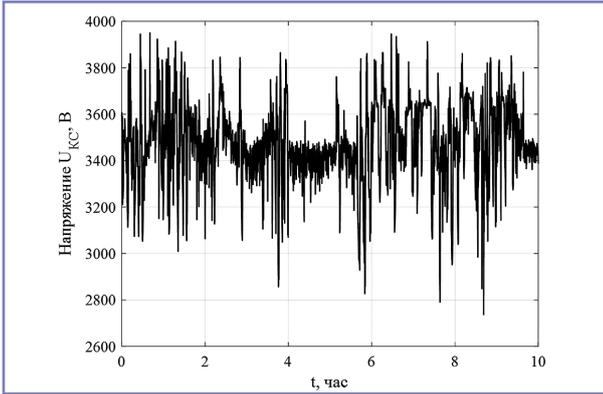


Рис. 1. Осциллограмма изменения напряжения на участке контактной сети

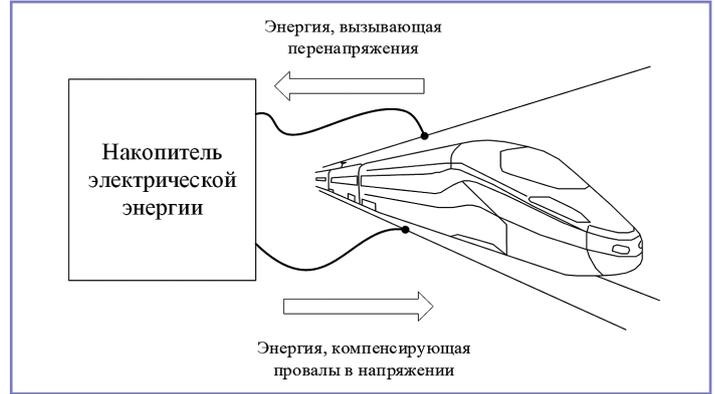


Рис. 2. Принцип работы стабилизатора напряжения контактной сети, использующего накопитель электрической энергии

Рассмотрим возможность использования в стабилизаторе напряжения контактной сети (СНК) кинетического накопителя электрической энергии [8].

СНК определяет величину среднего напряжения за заданный интервал времени  $U_{КС\text{сред}}$ :

$$U_{КС\text{сред}} = \frac{1}{T_{\text{сред}}} \cdot \int_0^{T_{\text{сред}}} U_{КС}(t) \cdot dt,$$

где  $U_{КС}$  – напряжение на участке контактной сети, удаленном от ТП;  $T_{\text{сред}}$  – заданный интервал времени, на котором определяется среднее напряжение КС.

В зависимости от знака разницы между текущим и средним значениями напряжения КС, СНК вырабатывает ток компенсации ( $I_{\text{Комп}} < 0$ ) или потребляет ( $I_{\text{Комп}} > 0$ ).

В режиме потребления тока электрической энергии СНК раскручивает маховик кинетического накопителя (ускорение – положительное), а в режиме выработки энергии затормаживает маховик ( $\varepsilon < 0$ ). Величина ускорения определяется величиной тока компенсации  $\varepsilon = f(I_{\text{Комп}})$ .

Энергия, потребляемая/отдаваемая СНК, определяется как:

$$E_{\text{СНК}} = \int (U_{КС} - U_{КС\text{сред}}) \cdot I_{\text{Комп}}(t) \cdot dt.$$

Текущая частота вращения маховика может быть определена из величины, потребляемой/отдаваемой энергии СНК:

$$\omega_{\text{СНК}} = \sqrt{2 \cdot \frac{E_{\text{СНК}}}{J_{\text{СНК}}}},$$

где  $J_{\text{СНК}}$  – момент инерции маховика кинетического накопителя энергии.

Для нормальной работы СНК необходимо, чтобы частота вращения маховика всегда оставалась в рабочем диапазоне  $\omega_{\text{min}} < \omega_{\text{СНК}} < \omega_{\text{max}}$ .

Величина тока компенсации не должна превышать допустимый ток СНК [7]:

$$|I_{\text{Комп}}| \leq I_{\text{Доп}}.$$

Функциональная схема СНК показана на рис. 3.

В блоке СУ ТП на основе измеренных  $U_{КС}$ ,  $U_{КС\text{сред}}$  и скорости вращения маховика задается режим работы СНК, и требуемая величина тока компенсации согласно выражению:

$$I_{\text{Комп}} = \begin{cases} I_{\text{Комп}} > 0, \varepsilon > 0, & \text{если } U_{КС} - U_{КС\text{сред}} > 0 \text{ и } \omega_{\text{СНК}} < \omega_{\text{max}} \\ I_{\text{Комп}} = 0, \varepsilon = 0, & \text{если } U_{КС} = U_{КС\text{сред}} \text{ и } \omega_{\text{СНК}} = \omega_{\text{max}} \text{ или } \omega_{\text{СНК}} = \omega_{\text{min}} \\ I_{\text{Комп}} < 0, \varepsilon < 0, & \text{если } U_{КС} - U_{КС\text{сред}} < 0 \text{ и } \omega_{\text{СНК}} > \omega_{\text{min}} \end{cases}$$

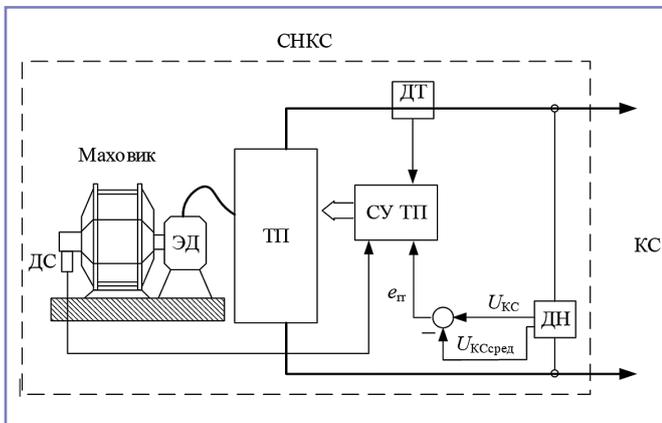


Рис. 3. Функциональная схема стабилизатора контактной сети с кинетическим накопителем электрической энергии: ДН – датчик напряжения контактной сети; ДТ – датчик тока СНК; ТП – транзисторный преобразователь для питания электродвигателя; СУ ТП – автоматическая система управления транзисторным преобразователем; ЭД – электрический двигатель; Маховик – кинетический накопитель электрической энергии

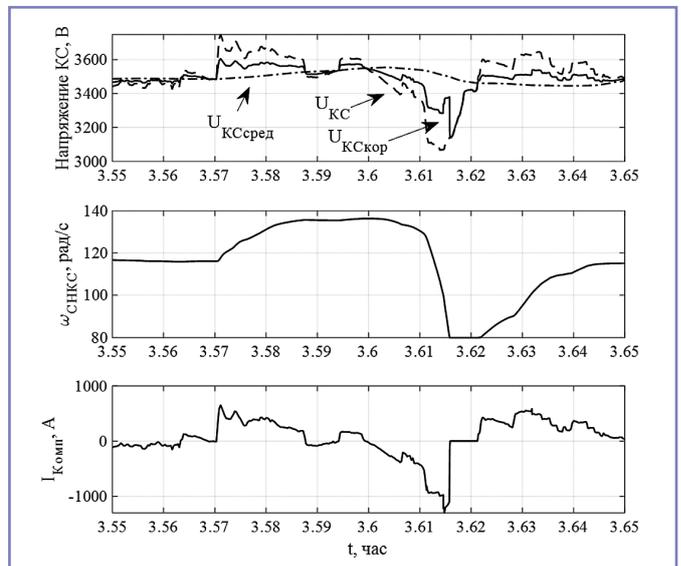


Рис. 4. График работы СНК

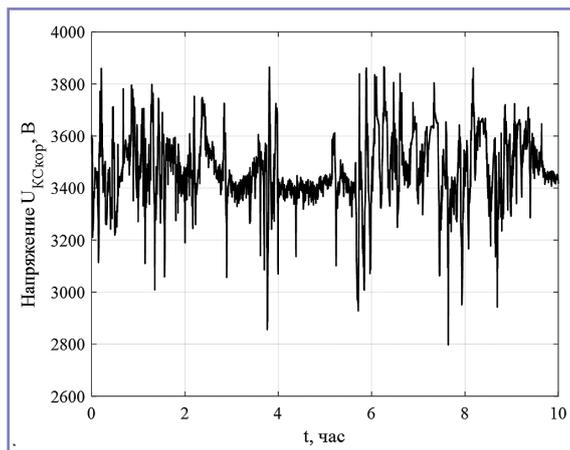


Рис. 5. Расчетная осциллограмма напряжения КС при работе СНКС

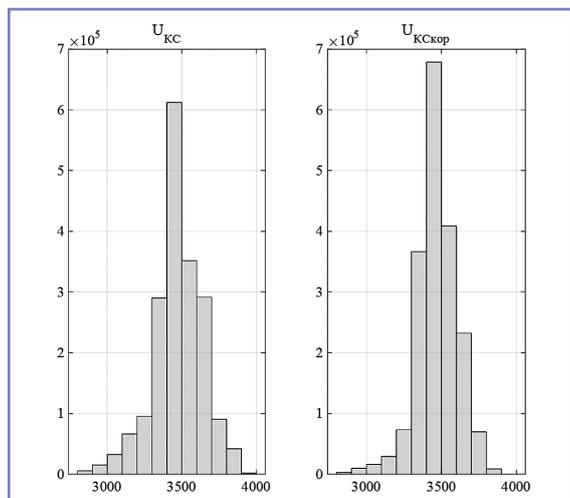


Рис. 6. Гистограмма распределения напряжений

маховика в режим рекуперативного торможения, и СНКС уменьшает величину провала до 3100 В. Отметим, что в момент 3,615 частота вращения маховика достигла границы рабочего диапазона  $\omega_{\text{КСКС}} = \omega_{\text{min}}$ , генерация энергии прекратилась.

На рис. 5 показана расчетная осциллограмма  $U_{\text{КСкор}}$ , полученная при моделировании. При сравнении осциллограмм рис. 1 и рис. 5 видно, что уменьшилась амплитуда перенапряжений и провалов в напряжении.

На рис. 6 показана гистограмма распределения напряжений КС, из которой видно, что при работе СНКС значительно уменьшился разброс напряжений.

Результаты моделирования продемонстрировали, что применение СНКС позволяет снизить пульсации и уменьшить разброс напряжений в контактной сети. Степень коррекции напряжения определяется допустимыми токами системы – транзисторный преобразователь, электрический двигатель. Часть энергии, высвобождаемой при рекуперативном торможении и запасенной в СНКС, можно использовать для питания ЭПС при его разгоне, не допуская ее перетоков по участкам сети, что разгрузит контактную сеть от передачи энергии до питающих фидеров и от перераспределения ее между ЭПС, что снизит величины потребляемых токов от ТП.

Соответственно, рациональным будет установка СНКС в местах с частыми остановками ЭПС.

### Литература

1. Титова Т.С., Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии. // Известия Петербургского университета путей сообщения, Т. 14, № 2, 2017, С. 200–210.
2. Евстафьев А.М., Титова Т.С. Энергосберегающие технологии на тяговом подвижном составе. // СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. –165 с.
3. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1. // Транспорт Российской Федерации, № 6, 2018, С. 40–44.
4. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Повышение эффективности электроподвижного состава. // Железнодорожный транспорт, № 9, 2010, С. 33–36.
5. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Применение энергонакопительных устройств на электроподвижном составе. // Транспорт Урала, № 2(21), 2009, С. 83–85.
6. Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Ковалёв Д.А., Воробьёв А.А., Макарова Е.И., Сацук Т.П. Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава. // Электротехника, № 4–2021, С. 36–41.

7. Ткачук А. А. Автореферат Стабилизация напряжения контактной сети трансформаторно-выпрямительным агрегатом тяговой подстанции постоянного тока 3,3 кВ. СР ФГБОУ ВО ПГУПС 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9 2017 16 с.

8. Гулиа Н.В., Кацай А.В. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоёмкости 2012 [Электрон. ресурс] <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm>. (дата обращения 20.03.2019).

### Шаряков 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.

### Шарякова 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 2004 году защитила диссертацию по теме «Синтез алгоритмов управления

электромеханическими системами вибрационных установок». Опыт работы – 26 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры электроэнергетики и электротехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

### Макарова Елена Игоревна

Родилась в 1975 году. В 1993 году окончила ПГУПС по специальности «Водоснабжение, водоотведение, рациональное использование и защита водных объектов». Доктор технических наук, профессор. 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 профессором кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 200 научных работ.

### 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.

### 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 2004 she defended her thesis on the topic "Synthesis of control algorithms for electromechanical systems of vibration machines". Work experience is 26 years. She works as an associate professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

### 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, 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 professor at the Department of electric traction of PGUPS. She has more than 200 scientific works.

### 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.

# Компьютерное моделирование емкостной компенсации реактивной мощности в тяговой сети

// Computer modeling of capacitive reactive power compensation in traction network //

Титова Т. С., д.т.н., профессор,  
Терёхин И. А., к.т.н., доцент,  
Володин А. А., к.т.н., доцент,  
Баранов И. А.,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*В статье представлена модель для анализа процессов емкостной компенсации реактивной мощности в тяговой сети, а также результаты демонстрационного расчёта. Модель позволит снизить затраты на проектирование усиления систем тягового электроснабжения с помощью емкостных компенсирующих устройств, а также на исследования предполагаемого эффекта от усиления.*

*Ключевые слова:* тяговое электроснабжение, емкостные компенсирующие устройства, компенсация реактивной мощности, усиление системы тягового электроснабжения, компьютерное моделирование в Matlab, поперечная компенсация.

Основной транспортной структурой в России является железная дорога. Именно поэтому основной её задачей является обеспечение быстрого и качественного пассажиро- и грузооборота по сети железных дорог. Этим показателям напрямую способствует электрификация, которая началась с середины прошлого века и до сих пор является важнейшим и неотъемлемым звеном технического прогресса транспортной инфраструктуры. Она позволяет существенно увеличить размеры движения по железным дорогам, повышать качество, количество и условия труда, наращивать эффективность работы, связанной с перевозками, а также снижать нагрузку на экологическую ситуацию, связанную с ростом промышленности и природных ресурсов, например, потребление топливно-энергетических ресурсов. В настоящее время более половины протяженности железных дорог России работает на электрической тяге, а она, в свою очередь, обеспечивает около 84% грузооборота и пассажирооборота российских железных дорог [1–4].

Непрерывная потребность в увеличении числа перевозок по железной дороге создаёт необходимость в высокой

*Modelling of reactive power capacitive compensation processes in traction network with regulated transverse capacitive compensating device, developed mathematical model and results of demonstration calculations are represented. The model will enable to reduce costs of designing of traction power supply systems amplification with the help of capacitive compensating devices, as well as to significantly reduce research costs of the supposed effect of amplification.*  
*Keywords:* traction power supply, capacitive compensating devices, reactive power compensation, amplification of traction power supply system, computer modeling in Matlab, transverse compensation.

надёжности системы электроснабжения (снижение числа отказов технических средств по вине хозяйства электроснабжения), безаварийность работы, а также уменьшение потерь при передаче, преобразовании и распределении электроэнергии регламентированного качества между потребителями [5–7].

Система тягового электроснабжения (СТЭ) – это сложный электротехнический комплекс, который, ввиду своих особенностей, оказывает вынужденное влияние в виде помех на смежные линии (СЛ) связи и управления, а также на качество электроэнергии в питающей сети внешнего электроснабжения (СВЭ). Особенности СТЭ приведены далее.

Первая особенность заключается в том, что электроподвижной состав (ЭПС) является однофазной нагрузкой с нелинейной резкопеременной характеристикой. А так как около 90% электропоездов и электропоездов, применяемых в России, имеют двухполупериодные выпрямители и коллекторные тяговые двигатели, то в составе потребляемого тока преобладают нечетные гармоники низкой частоты, и, как правило, учитывают только 150 Гц, 250 Гц и 350 Гц. Отсюда несинусоидальность

токов вызывает искажающие помехи напряжения в СТЭ, и, как следствие, в СВЭ.

Вторая особенность – это необходимость учитывать распределённость параметров контактной сети при гармониках около 500 Гц и выше, а именно – учитывать волновой характер процессов, который обусловлен резонансными явлениями, вызывающими перенапряжения на оборудовании СТЭ и токоприёмниках ЭПС.

Третья особенность – динамическая и резкоизменяющаяся нагрузка ЭПС, обусловленная постоянным изменением режима работы при движении ЭПС по межподстанционной зоне (МПЗ). Как следствие, такие нагрузки и их сочетания вызывают непренебрежимые колебания активной и реактивной мощностей. Устойчивый режим работы СТЭ можно достичь, применяя регулирующую емкостную компенсацию реактивной мощности [8–10].

Регулируемые поперечные емкостные компенсирующие устройства (ПЕКУ) и регулируемые устройства продольной емкостной компенсации (УПЕК) являются фундаментальными средствами поддержки установленного нормального уровня напряжения на токоприёмнике и качества электроэнергии в СТЭ. Установка ПЕКУ и УПЕК способна решить ряд задач по усилению и улучшению СТЭ:

- компенсация реактивной мощности, что ведёт к повышению уровня напряжения на токоприёмнике и на контактом проводе в целом;
- снижение перенапряжений в контактной сети;
- снижение амплитуд высокочастотных гармоник для ограничения негативного влияния СТЭ на СЛ и СВЭ;
- демпфирование резонансов, вызванных волновыми процессами.

Из вышесказанного следует то, что задача усиления СТЭ в настоящее время является актуальной. А применение компьютерного моделирования позволяет упростить процесс проектирования СТЭ и снизить затраты на исследования эффективности и влияния предлагаемого усиления СТЭ [11–13].

## Описание разработанной компьютерной модели

В программном пакете MATLAB-Simulink разработана модель для исследований влияния усиления за счёт

регулируемых устройств емкостной компенсации реактивной мощности, происходящих при усилении СТЭ (рис. 1), которая состоит из следующих подмоделей [14, 15]:

- модель идеализированного регулируемого поперечного емкостного компенсирующего устройства реактивной мощности с фильтром низких частот (до 19-й гармоники) (рис. 2);
- модель электроподвижного состава – электровоза 2ЭС5К (рис. 3);
- модель системы тягового электро-снабжения (рис. 4);
- модель системы внешнего электро-снабжения (рис. 5).

Рассмотрен режим одностороннего питания, как наиболее тяжёлый из режимов.

Расчёты произведены посредством мгновенных схем для разных координат ЭПС на МПЗ при отсутствии устройства компенсации и при его наличии. Мгновенные схемы соответствуют прохождению пяти электровозов друг за другом по МПЗ, длина которой 60 км.

Для каждой мгновенной схемы выполняется гармонический анализ напряжений, осциллограммы токов и напряжений в СТЭ и СВЭ для наглядной демонстрации фильтрующего действия устройства компенсации.

Так как модель является математической, а устройство компенсации идеализировано, уставка реактивной мощности компенсирующего устройства стремится к нулю. Т.е. модель рассчитывает необходимую и достаточную реактивную мощность во время движения электровозов, и далее блок управления регулирует ёмкость компенсирующего устройства таким образом, чтобы она могла полностью обеспечить компенсирующий эффект.

**Результаты демонстрационного расчёта**

С помощью разработанной компьютерной модели произведён расчёт 9 мгновенных схем. Результаты расчёта при отсутствии регулируемого ПЕКУ сведены в таблицу 1. По рис. 6 видно, что напряжения на тяговой подстанции (ТП) опускается до 23кВ, а на посту секционирования (ПС) до 19кВ.

На рис. 7 представлено изменение уровней напряжений на токоприёмнике ЭПС. Важно, что на 5-й мгновенной схеме, когда на МПЗ находятся все 5 поездов, напряжение на токоприёмнике наиболее удалённых от ТП поездов опускается ниже минимального значения в 19 кВ и даже ниже 18 кВ.

Рис. 8 демонстрирует уменьшение КПД ниже отметки 90%, что достаточно низко по современным меркам электрических систем, также видно снижение среднего коэффициента мощности ( $\cos\phi$ ) СТЭ до 0,81.

На рис. 9 представлен гармонический состав в СТЭ.

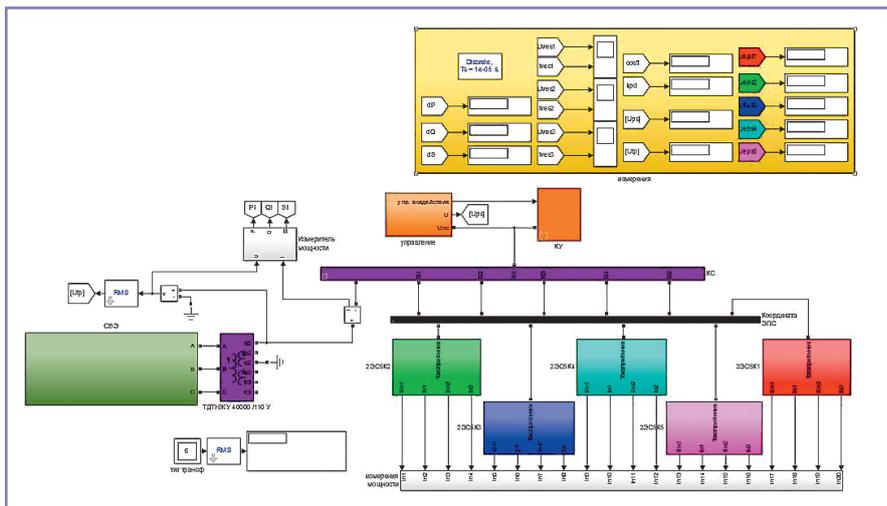


Рис. 1. Разработанная компьютерная модель

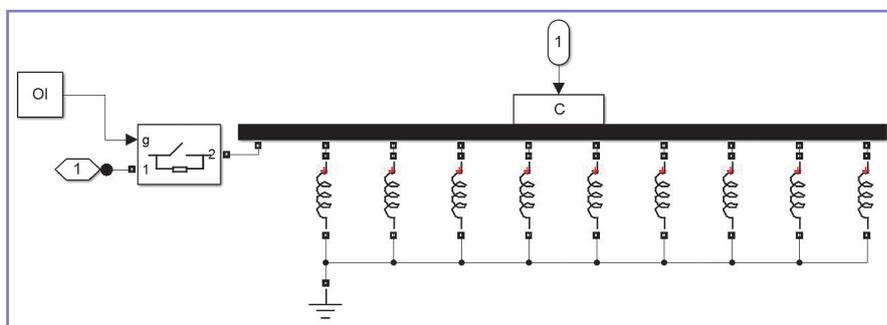


Рис. 2. Модель идеализированного регулируемого компенсирующего поперечного емкостного устройства реактивной мощности с фильтром низких частот

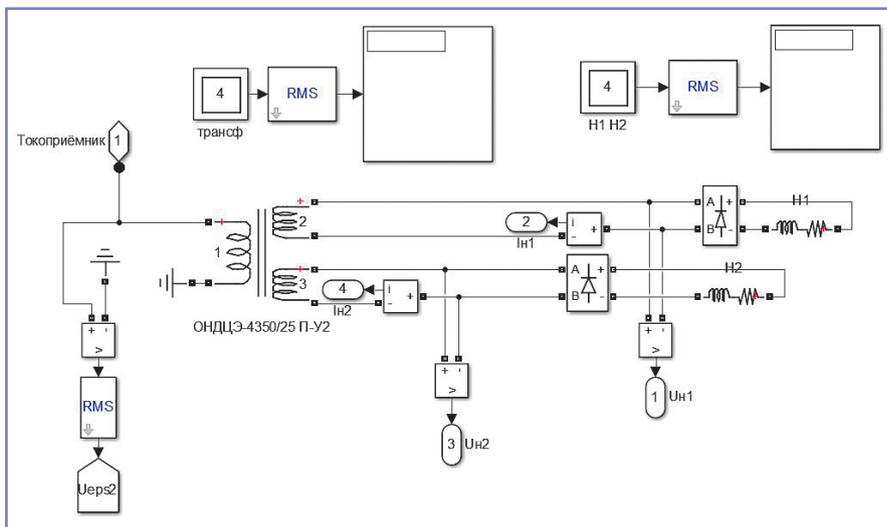


Рис. 3. Модель электроподвижного состава – электровоза 2ЭС5К

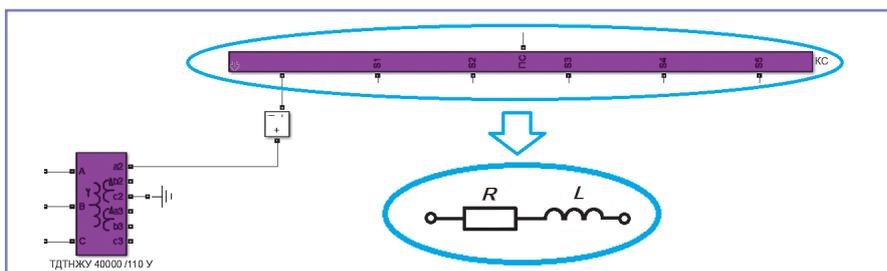


Рис. 4. Модель системы тягового электро-снабжения

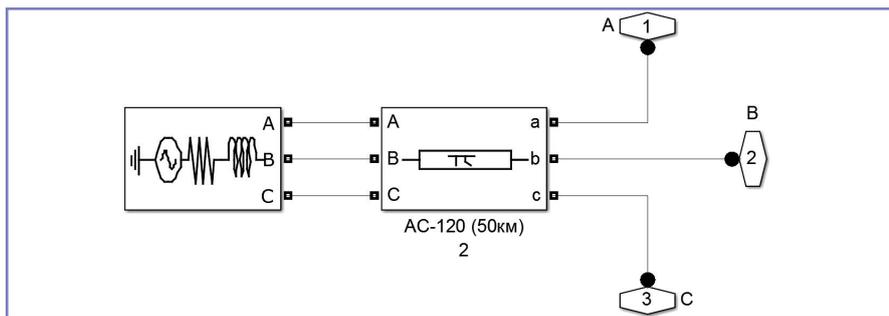


Рис. 5. Модель системы внешнего электроснабжения

Аналогичный расчёт произведён при наличии регулируемого ПЕКУ реактивной мощности. Полученные результаты (таблица 2) говорят об увеличении напряжения на ТП, которое не опускается ниже 24 кВ и ПС, где напряжение доходит до 22 кВ (рис. 10). По изменению напряжений на токоприёмниках наблюдается повышение уровня напряжения, которое для наиболее

отдалённых поездов не опускается ниже 20 кВ (рис. 11).

КПД всё ещё опускается до низких значений (специально был выбран наиболее тяжёлый режим работы), но уже не переходит границу в 90%. А коэффициент мощности значительно увеличивается и меняется в границах 0,95–0,99, что говорит об эффективности регулируемого ПЕКУ реактивной

мощности (рис. 12). Ко всему вышесказанному, поскольку компенсирующее устройство используется совместно с фильтром низких частот, по спектру гармоник на рис. 13 продемонстрировано, что гармоники практически полностью гасятся фильтром.

### Выводы

Разработанная в программном пакете Matlab-Simulink компьютерная модель позволяет рассчитывать мгновенные схемы и анализировать влияние СТЭ на СВЭ, а также регулируемых устройств емкостной компенсации реактивной мощности на уровень напряжения в СТЭ и на токоприёмнике ЭПС, а также непосредственно и саму СТЭ в целом. Кроме того, предшествующее построению конкретной СТЭ компьютерное моделирование позволяет максимально эффективно использовать временные и материальные ресурсы инженера за счёт своевременного выявления неэффективных или даже ошибочных технических решений.

Таблица 1. Результаты расчётов исходной СТЭ

№ мгновенной схемы	Напряжение на ТП, кВ	Напряжение на ПС, кВ	Напряжение ЭПС 1, кВ	Напряжение ЭПС 2, кВ	Напряжение ЭПС 3, кВ	Напряжение ЭПС 4, кВ	Напряжение ЭПС 5, кВ	КПД, %	cosφ
1	25,08	25,06	25,08	-	-	-	-	95,6	0,928
2	24,58	23,95	23,95	24,58	-	-	-	96,9	0,914
3	24,05	22,24	22,24	22,82	24,05	-	-	96,2	0,894
4	23,57	20,64	20,11	20,64	21,76	23,57	-	94,5	0,869
5	23,14	19,22	17,75	18,22	19,22	20,82	23,14	92,3	0,843
6	23,59	19,61	-	18,11	18,59	19,61	21,24	89,9	0,815
7	24,05	20,53	-	-	18,97	19,48	20,53	89,0	0,810
8	24,53	22,05	-	-	-	20,41	20,94	89,5	0,826
9	25,03	23,72	-	-	-	-	22,54	90,3	0,866

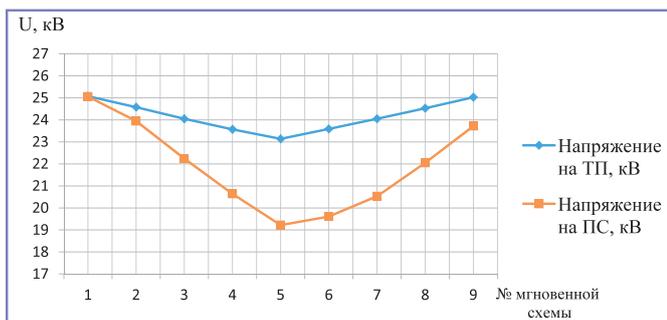


Рис. 6. Изменение напряжения на тяговой подстанции и посту секционирования без компенсации

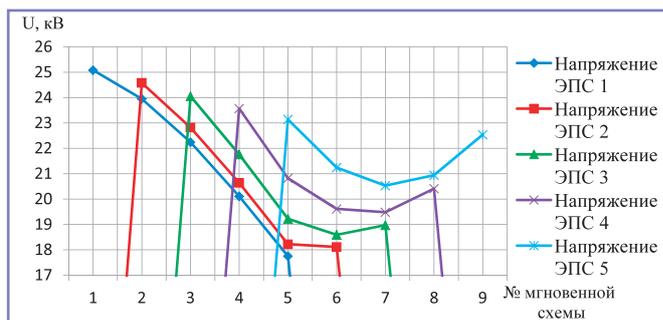


Рис. 7. Изменения напряжений на токоприёмниках ЭПС без компенсации

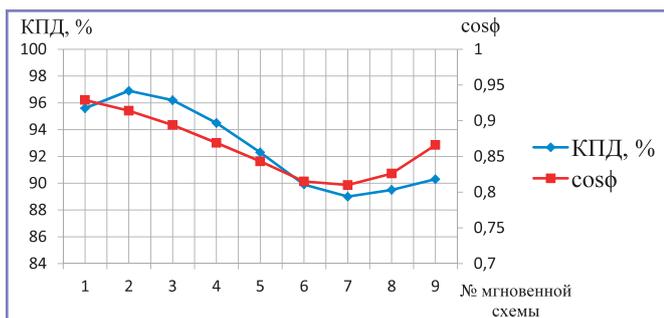


Рис. 8. Изменения КПД и коэффициента мощности без компенсации

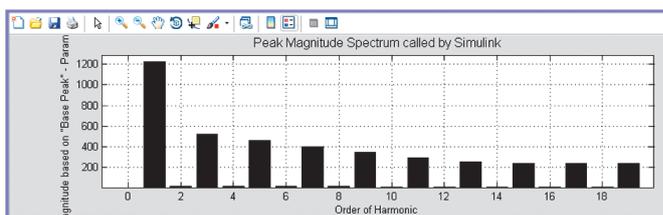


Рис. 9. Гармонический состав в СТЭ без компенсации

Таблица 2. Результаты расчётов усиленной СТЭ

№ мгновенной схемы	Напряжение на ТП, кВ	Напряжение на ПС, кВ	Напряжение ЭПС 1, кВ	Напряжение ЭПС 2, кВ	Напряжение ЭПС 3, кВ	Напряжение ЭПС 4, кВ	Напряжение ЭПС 5, кВ	КПД, %	cosφ
1	25,33	25,94	25,33	-	-	-	-	95,4	0,998
2	25,09	25,71	25,07	25,09	-	-	-	96,7	0,997
3	24,73	24,58	24,58	24,3	24,73	-	-	96,2	0,994
4	24,28	23,25	22,66	23,25	23,37	24,28	-	94,8	0,984
5	23,89	22,1	20,44	20,97	22,1	22,55	23,89	92,9	0,973
6	24,18	21,77	-	20,14	20,66	21,77	22,55	91,0	0,958
7	24,54	22,21	-	-	20,55	21,07	22,21	90,4	0,956
8	24,91	23,32	-	-	-	21,57	22,13	90,6	0,964
9	25,26	24,47	-	-	-	-	23,24	91,2	0,981

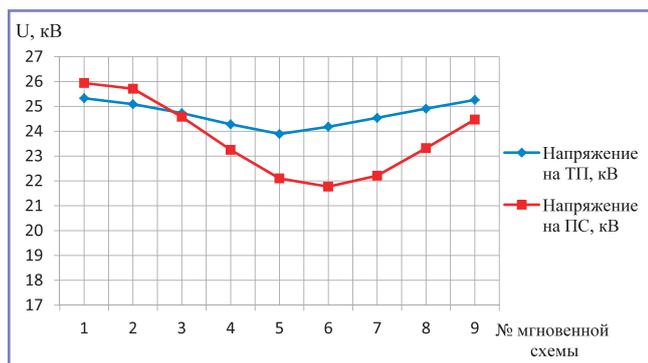


Рис. 10. Изменения напряжения на тяговой подстанции и посту секционирования при наличии компенсации

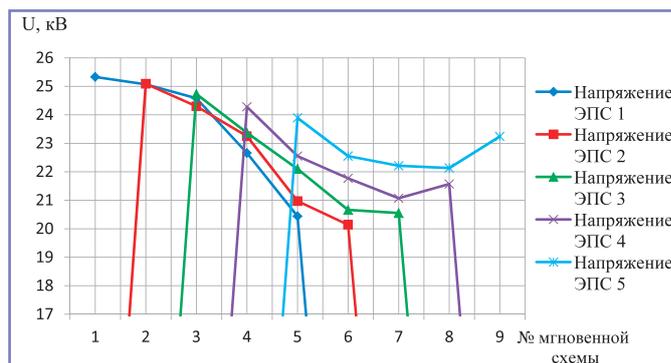


Рис. 11. Изменения напряжений на токоприёмниках ЭПС при наличии компенсации

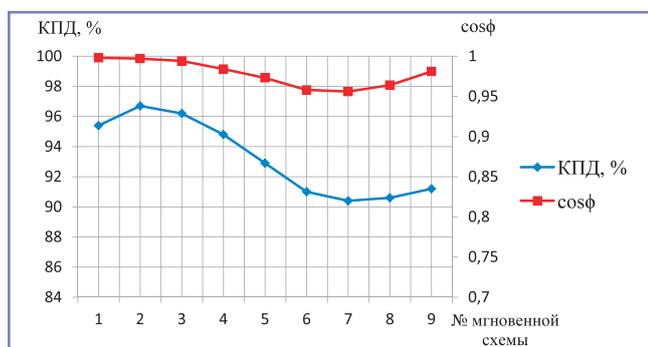


Рис. 12. Изменение КПД и коэффициента мощности при наличии компенсации

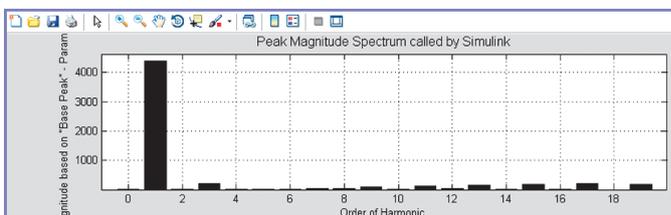


Рис. 13. Гармонический состав в СТЭ при наличии компенсации

**Литература**

1. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 г. и на перспективу до 2030 г. № 269р – М.: ОАО «РЖД», 2008. – 76 с.
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. / Утверждена распоряжением № 877-р Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г.
3. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г./ Утверждена распоряжением № 1734-р Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г.
4. Гапанович В.А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог. / В.А. Гапанович, С.Н. Епифанцев, В.А. Овсейчук / Под ред. Г.П. Кутового – М.: Эко-Пресс, 2012. – 196 с.
5. Игнатенко И.В. Электроснабжение железных дорог: учеб. пособие в 2 ч / И.В. Игнатен-

- ко. – Хабаровск: ДВГУПС, 2013, Ч. 1. – 113 с.
6. Чернов Ю.А. Электроснабжение электрических железных дорог: учеб. пособие в 3 ч / Ю.А. Чернов. – М.: МИИТ, 2012, Ч. 3. – 170 с.
7. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник для вузов ж.д. транспорта / Марквардт К.Г. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
8. Герман Л.А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог / Л.А. Герман, А.С. Серебряков. – М.: МИИТ, 2011. – 162 с.
9. Требования нормативных документов к конденсаторным установкам. URL: [https://studref.com/387999/tehnika/trebovaniya\\_normativnyh\\_dokumentov\\_kondensatorniya\\_ustanovkam](https://studref.com/387999/tehnika/trebovaniya_normativnyh_dokumentov_kondensatorniya_ustanovkam) (дата обращения: 01.08.2021).
10. Тер-Органов Э.В. Электроснабжение железных дорог: учебник для студентов универ-

- ситета (УрГУПС) / Э.В. Тер-Органов, А.А. Пышкин. – Екб.: УрГУПС, 2014. – 432 с.
11. Статья «Наука на службе электрификации железных дорог» газеты «Евразия вестн». URL: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2013-10a08> (дата обращения: 01.08.2021).
12. Статья «Электроэнергетическая инфраструктура тягового электроснабжения» газеты «Евразия вестн». URL: <http://www.eav.ru/publ1r.php?publid=2014-10a19> (дата обращения: 01.08.2021).
13. Статья «Регулируемые установки емкостной компенсации тягового электроснабжения» газеты «Евразия вестн». URL: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2011-10a12> (дата обращения: 01.08.2021).
14. Р 640. Общие методы выбора параметров и оценки эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности в тяговой сети переменного тока. Памятка

ОСЖД. URL: <https://osjd.org/ru/8954/page/106077?id=2583> (дата обращения: 01.08.2021).  
15. Бурьяноватый А.И. Основы компьютерного проектирования и моделирования устройств электроснабжения. Практикум: учеб. пособие / А.И. Бурьяноватый, М.А. Иванов, Э.А. Иванова, А.Е. Шаговик. – СПб.: ПГУПС, 2019, – 56 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 – 40 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.

#### **Терехин Илья Александрович**

Родился в 1991 году. В 2013 году окончил Омский государственный университет путей сообщения по специальности «Энергообеспечение предприятий». Кандидат технических наук, доцент. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование системы заземления опор контактной сети в тяговом электроснабжении переменного тока». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение же-

лезных дорог», начальником Управления воспитательной работы и производственного обучения. Имеет 41 научный труд.

#### **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 – 35 лет. В настоящее время работает доцентом ПГУПС. Имеет более 30 научных работ.

#### **Баранов Иван Александрович**

Родился в 1998 году. В 2021 году окончил ПГУПС по специальности «Системы обеспечения движения поездов». Опыт работы – 1 год. В настоящее время работает инженером отдела молодежных программ ПГУПС. Имеет 2 научных труда.

#### **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 40 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.

#### **Terekhin Ilya**

Was born in 1991. In 2013 he graduated from the Omsk State Transport University with a degree in “Power Supply for Enterprises”. Candidate of Engineering sciences, Associate Professor. In 2018 he defended thesis on the topic “Improving the grounding system of overhead contact network supports in AC traction power supply”. Work experience – 8 years. Currently works as an associate professor of the department “Power supply of railways”, head of the Department of educational work and industrial training. Has 41 scientific papers.

#### **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 35 years of work experience. At present he works as associate professor of PGUPS. He has more than 30 scientific works.

#### **Baranov Ivan**

Was born in 1998. In 2021 he graduated from PGUPS with a degree in “Train traffic support systems”. Work experience – 1 year. He currently works as an engineer in the department of youth programs at PGUPS. Has 2 scientific works.

# Повышение эффективности рекуперативного торможения электропоездов метрополитенов

// Improving the efficiency of regenerative braking of metro electric trains //

**Мазнев А.С., д.т.н., профессор,  
Викулов И.П., к.т.н., доцент,  
Волов А.В., Теличенко С.А.,  
ПГУПС, Санкт-Петербург**

*Выполнен анализ полупроводниковых систем управления моторных вагонов электропоездов метрополитенов. Предложены решения, позволяющие осуществлять рекуперативное торможение при независимом и последовательном возбуждении тяговых двигателей за счёт устранения жёсткой связи между обмотками якорей и возбуждения в диапазоне скоростей движения от максимальной, составляющей 90 км/ч, до минимальной, равной приблизительно 5 км/ч.*

*Ключевые слова: импульсное регулирование, рекуперативное торможение, электропоезда метрополитена.*

Основные требования к подвижному составу метрополитена по обеспечению неуклонно и интенсивно растущих городских пассажирских перевозок – низкое энергопотребление, высокая скорость перемещения и безопасность при минимально вредном воздействии на окружающую среду.

Большая интенсивность строительства в крупных городах приводит к увеличению пассажиропотока и ухудшению условий эксплуатации наземных видов транспорта, вызванных резким ростом количества автомобилей, снижающих их маршрутную скорость. Значительная часть горожан при выборе вида транспорта предпочитает метрополитен из-за стабильности движения точно по расписанию и высокой скорости.

С развитием метрополитена возрастает парк поездов и потребление электроэнергии.

Эксплуатируемые отечественными метрополитенами электропоезда постоянного тока на основе серийных вагонов 81–717/714 имеют существенные недостатки в виде реостатно-контакторной системы пуска тяговых электрических двигателей (ТЭД) без рекуперативного торможения.

Применение импульсного регулирования позволит реализовать не только

*The analysis of semiconductor control systems of motor cars of electric trains of subways is carried out. The article offers solutions that allow for regenerative braking with independent and series excitation of traction motors. This is possible by eliminating the rigid connection between the armature and the excitation windings. At the same time, the speed range is from a maximum of 90 km/h to a minimum of approximately 5 km/h.*

*Keywords: pulse regulation, regenerative braking, electric trains of subways.*

рекуперативное торможение, но и избежать от дополнительных потерь энергии в пусковых реостатах, большого количества контакторов в силовой цепи и толчков силы тяги, характерных для реостатно-контакторных систем управления.

Учитывая, что в метрополитенах нашей страны и ближнего зарубежья остается значительная часть электропоездов различных модификаций с коллекторным тяговым приводом, срок эксплуатации которых составит ещё несколько десятков лет, повышение энергетической эффективности остается актуальной задачей, так как затраты энергии на тягу поездов составляют значительную часть расходов.

Основные показатели технико-экономической эффективности, применимые к электрическому подвижному составу:

- стоимость электропоезда;
- расход электроэнергии для выполнения одной и той же работы;
- надежность;
- динамика вагонов;
- скорость движения и ускорение;
- автоматизация управления.

Выполнение этих требований невозможно без использования рекуперативного торможения.

Работы по внедрению полупроводниковых систем управления велись со второй половины 1960-х годов на электропоездах серии «Е» [1]. Созданный в 1974 году электропоезд 81–715/716 (серия «И»), также как и вагоны серии «Е», был оснащен безреостатным пуском и системой рекуперативного торможения. Силовые преобразователи были выполнены на однооперационных тиристорах, и тягово-энергетические испытания не показали преимуществ в сравнении с моделями, имеющими реостатный пуск.

Предпринимались попытки оснастить вагоны модели 81-720/721 «Яуза» тиристорными системами управления, которые не привели к успеху. В результате внедрение бесконтактных систем управления на электропоездах метрополитена прекратилось.

Полупроводниковые управляемые приборы позволили приступить к использованию асинхронного тягового электропривода (АТП). Начиная с 1998 года, велись работы по оснащению электропоезда «Яуза» зарубежным асинхронным тяговым приводом. Параллельно проводилась разработка АТП отечественными специалистами.

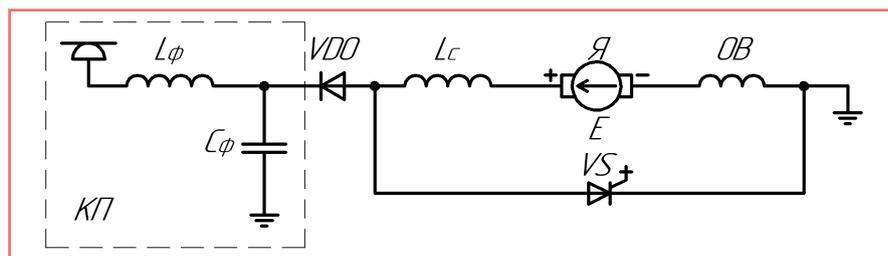


Рис. 1. Схема импульсного регулирования рекуперативного торможения:

$L_\phi$ ,  $C_\phi$  – индуктивность и ёмкость сетевого фильтра;  $VD0$  – обратный диод;  
 $L_c$  – индуктивность сглаживающего реактора,  $VS$  – импульсный преобразователь;  
 $Я$ ,  $OB$  – обмотка якоря и возбуждения ТЭД; КП – контур питания

С 2002 по 2012 год велись работы по созданию вагонов с асинхронным тяговым приводом 81–740/741 «Русич». С 2012 года поезд поступил в эксплуатацию под названием «Ока» [2].

Сущность импульсного управления в режиме тяги состоит в периодическом подключении источника энергии к нагрузке с помощью преобразователя.

Принципиальная схема управления тяговым двигателем в режиме рекуперативного торможения представлена на рис. 1.

В режиме рекуперативного торможения двигателя переводятся в генераторный режим, ток двигателя возрастает по контуру: якорь Я – индуктивность  $L_c$  – преобразователь VS – обмотка OB.

После выключения тиристорного преобразователя VS энергия поступает в контур источника питания КП [1, 3]. Особенность силовой схемы – жёсткая связь обмоток якоря и возбуждения.

Схема на рис. 1 имеет существенный недостаток. Применение импульсного управления рекуперации ограничено начальной скоростью торможения (критической  $V_{кр}$ ). На скорости торможения выше критической возникает режим потери управляемости системой регулирования, что обусловлено жёсткой связью обмоток якоря и возбуждения.

Повысить скорость начала торможения можно за счёт использования перекрестно-петлевой схемы обмоток якоря и возбуждения тяговых двигателей [4].

На рис. 2 приведена принципиальная схема для пуска и электрического торможения (рекуперативного и реостатного) моторного вагона.

В режиме тяги (контактор К замкнут) с помощью «ключей» VS1 и VS2 регулируется напряжение на зажимах тяговых двигателей Я1, Я3 и Я2, Я4 соответственно. В интервале паузы, когда тиристорно-импульсные преобразователи (ТИП) VS1 и VS2 выключены, токи двигателей замыкаются через диоды VD3 и VD4.

Для перевода схемы в режим рекуперативного торможения необходимо

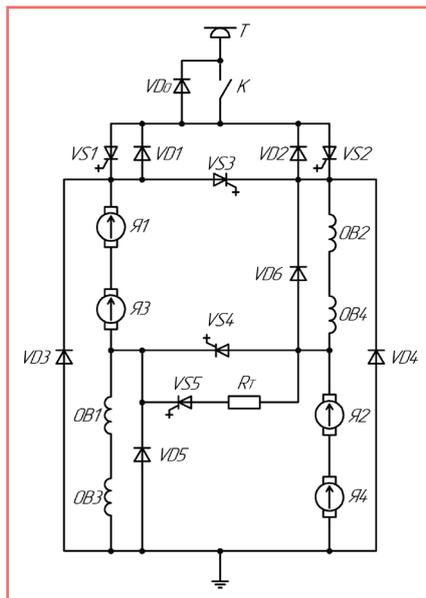


Рис. 2. Схема моторного вагона с рекуперативно-резисторным торможением: VS1-VS5 – импульсные преобразователи; VD0, VD1-VD6 – обратные диоды; Я1, Я2, Я3, Я4 – обмотки якорей ТЭД; OB1, OB2, OB3, OB4 – обмотки возбуждения ТЭД; Rr – тормозной резистор; Т – токоприемник; К – контактор отключения моторного режима

выключить VS1, VS2 и контактор К. При отпирании VS3 и VS4 тяговые двигатели переходят в режим генераторов с последовательным возбуждением, в результате токи якорей Я1-Я4 и обмоток OB1-OB4 увеличиваются. После запираания VS3 и VS4 токи якорей будут протекать через диоды VD1, VD2, VD0 и источник питания, а токи возбуждения замкнутся в контурах, образованных диодами VD5, VD6.

Так как в режиме рекуперации обмотки возбуждения двигателей отделены от обмоток якорей, то ограничение по максимальной скорости начала торможения отсутствует.

Для улучшения регулировочных свойств тягового привода моторного вагона может быть использована схема, реализующая режим рекуперативного торможения с последовательным и независимым возбуждением.

На рис. 3 изображена одна фаза преобразователя для регулирования

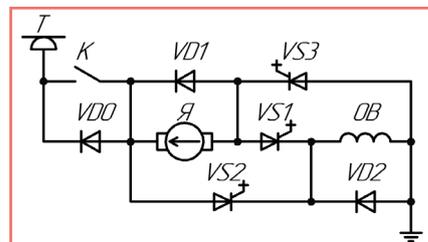


Рис. 3. Схема импульсного пуска и рекуперативного торможения: Т – токоприемник; К – контактор; VD0, VD1, VD2 – обратные диоды VS1-VS3 – импульсные преобразователи; Я, OB – обмотка якоря и возбуждения ТЭД

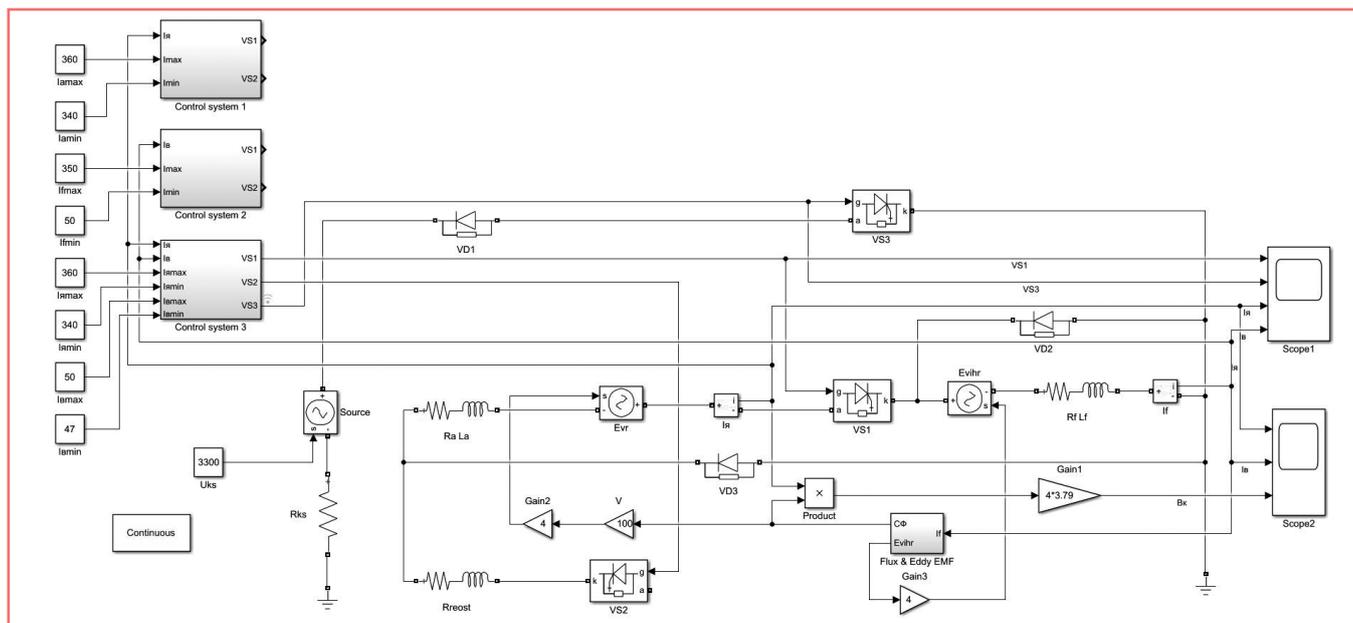


Рис. 4. Схема имитационной модели электропоезда постоянного тока в тормозном режиме: Control system 1, 2, 3 – блоки управления; Source – источник напряжения КС с уровнем  $U_{кс}$ ; Rks – сопротивление КС; Evlhr – источник ЭДС вращения ТЭД; Flux&EddyEMF – блок формирования магнитного потока и ЭДС вихревых токов Evlhr; V – скорость электропоезда; Gain1 – коэффициент тормозной силы; Gain 2, 3 – число ТЭД; Ra La, Rr Lf – сопротивления и индуктивности обмоток якоря и обмоток возбуждения; Rreost – сопротивление тормозного резистора; Ia, If – датчики тока якоря и возбуждения

напряжения двух последовательно соединенных тяговых двигателей.

В моторном режиме (контактор К замкнут) после отпирания VS1 обмотки якоря и возбуждения соединяются последовательно. После выключения VS1 токи якоря и обмотки возбуждения протекают по диодам VD1 и VD2 соответственно.

Рекуперативное торможение с независимым возбуждением осуществляется путем регулирования тока в обмотке ОВ с помощью VS2. При ЭДС вращения двигателей большей напряжения питания, отпирание ключа VS3 приведет к реализации рекуперативного торможения. Ток рекуперации протекает по контуру: якорь Я – источник питания – ключ VS3 – якорь Я.

На низких скоростях торможения контактор К выключается, и реализуется импульсная рекуперация с последовательным возбуждением тягового генератора путем периодического отпирания «ключей» VS2 и VS3 [5, 6].

Для исследования процессов импульсного торможения в схеме разработана имитационная модель в программном пакете Simulink среды MATLAB, схема которой приведена на рис. 4.

В качестве объекта моделирования принят моторный вагон с тяговыми

двигателями ДК-117А, движущийся с постоянной скоростью, рекуперирующий на источник питания (контактную сеть) с постоянным напряжением 800 В. Результаты моделирования при скорости начала торможения ниже критической представлены на рис. 5. На осциллограммах видно, что значение тока якоря изменяется в заданных пределах от 340 до 360 А [7].

Если скорость движения при начале рекуперативного торможения выше критической, то значение тока якоря резко возрастает, многократно превышая значение тока уставки. На осциллограммах, представленных на рис. 6, полученных в результате моделирования при скорости выше критической, ток якоря достигает значения более 2000 А, что недопустимо, и приведет к выходу из строя тяговой электрической машины [8, 9].

### Выводы

1. Жёсткая связь между якорем двигателя и обмоткой возбуждения ограничивает начальную скорость импульсного рекуперативного торможения. При превышении критической скорости ЭДС вращения двигателя будет больше напряжения источника питания. Данный режим работы неустойчив и ведёт к нарушению процесса торможения.

2. Разделение обмотки якоря и возбуждения в режиме рекуперации обеспечивает контроль над торможением, но в то же время приводит к превышению токов якоря при скорости начала торможения выше критической.

3. Применение независимого возбуждения с возможностью регулирования тока в обмотке возбуждения позволяет получить устойчивый режим работы на скорости выше критической.

### Литература

1. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока / В.Е. Розенфельд, В.В. Шевченко, В.А. Майбога, Г.П. Долаберидзе. – Москва: Изд-во «Транспорт», 1970. – 240 с.
2. Мнацаканов, В. А. К истории отечественного метровагоностроения / В.А. Мнацаканов // Метро и тоннели. – № 3. – 2015. – с. 28–33.
3. Гаврилов, Я.И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями / Я.И. Гаврилов, В.А. Мнацаканов. – Москва: Изд-то «Транспорт», 1986. – 229 с.
4. Назаров, О.Н. Совершенствование методов определения и сравнительного анализа тягово-энергетических показателей пригородных электропоездов: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Назаров Олег Николаевич. – Москва, 2000. – 161 с.
5. Патент № 2629617 С1 Российская Федерация, МПК В60L 9/04, В60L 7/22, В60L 15/04. Устройство регулирования скорости электроподвижного состава: № 2016117622: заявл. 04.05.2016; опубл. 30.08.2017 / А.С. Мазнев, В.А. Баранов, И.П. Викулов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».
6. Патент № 2673567 С1 Российская Федерация, МПК H02P 7/06, H02P 7/29, H02P 7/298. Устройство для регулирования скорости тягового электродвигателя: № 2018105827: заявл. 15.02.2018; опубл. 28.11.2018 / А.С. Мазнев, А.А. Киселев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».
7. Мазнев А.С., Викулов И.П., Волон А.В. Имитационное моделирование режимов рекуперативно-резисторного торможения электропоездов метрополитена / Прорывные технологии электрического транспорта: тезисы докладов IX Международного симпозиума Элтранс-2017 (Eltrans-2017), посвященный 130-летию основания Г.К. Мерчингом Электротехнической школы в России, Санкт-Петербург, 18–20 октября 2017 г. / Под редакцией д.т.н., проф. Буркова, д.т.н., доц. В.В. Никитина – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – с. 57–58.

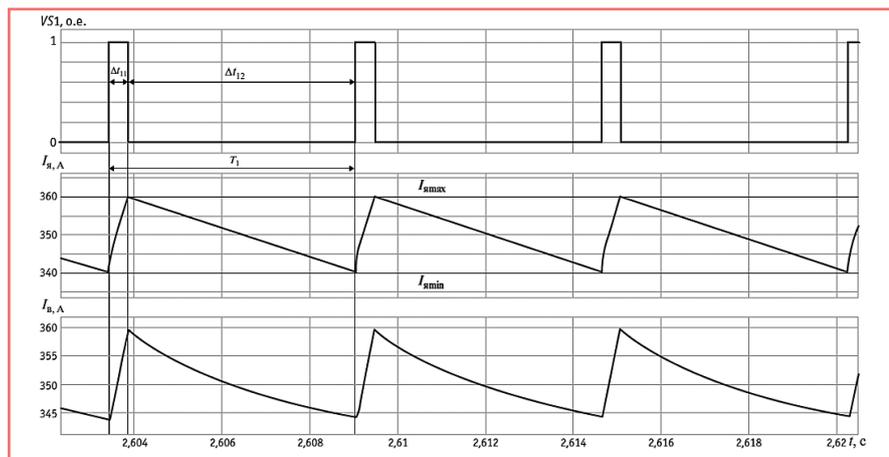


Рис. 5. Результаты моделирования при скорости ниже критической

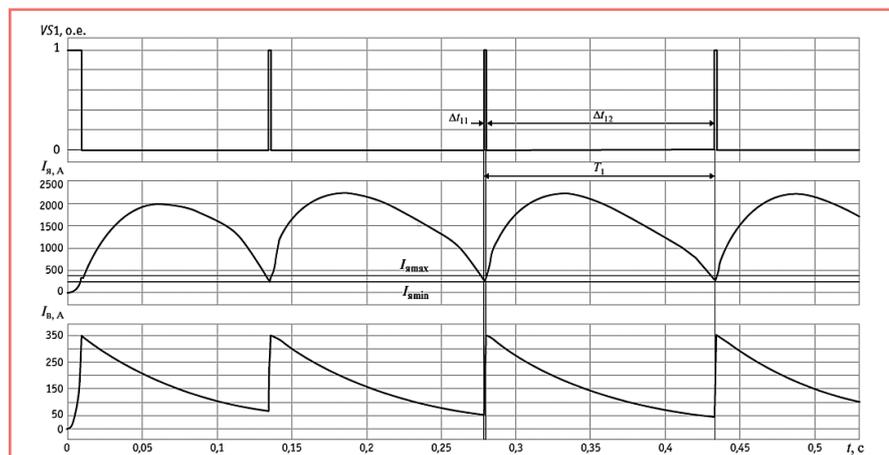


Рис. 6. Результаты моделирования при скорости выше критической

8. Мазнев, А.С. Влияние принципа управления полупроводниковым преобразователем на регулировочные свойства и характеристики электропоездов постоянного тока / А.С. Мазнев, А.А. Киселев, А.В. Волов // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – Вып. 1. – с. 70–84.

9. Структура и принципы управления много-режимным полупроводниковым преобразователем электропоезда постоянного тока / А.А. Киселев, А.С. Мазнев, А.В. Третьяков [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 6. – С. 27–31.

#### **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.

#### **Виколов Илья Павлович**

Родился в 1981 году. В 2004 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Кандидат технических наук. В 1991 году защитил диссертацию по теме «Усовершенствование

алгоритмов управления тяговыми электродвигателями электропоезда переменного тока с зонно-фазовым регулированием». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 40 научных трудов.

#### **Волов Алексей Викторович**

Родился в 1993 году. В 2016 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Подвижной состав железных дорог». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает ассистентом в ПГУПС. Имеет 5 печатных работ.

#### **Теличенко Станислав Алексеевич**

Родился в 1989 году. В 2013 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 5 публикаций в рецензируемых журналах, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Maznev Alexander**

Was born in 1939. In 1961 he graduated from the Ural Electromechanical Institute of Railway Engineers. Doctor of technical sciences, professor. In 1991 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.

#### **Vikulov Ilya**

Was born in 1981. In 2004 he graduated from the St. Petersburg State University of Railways with a degree in Communications Engineer – electromechanics. Candidate of Engineering Science. In 2009 he defended his thesis on the topic «Improvement of control algorithms for traction motors of an alternating current electric train with zone-phase control». Work experience is 15 years. At present he works as an associate professor of the «Electric traction» department of PGUPS. He has over 40 scientific publications.

#### **Volov Aleksey**

Was born in 1993. In 2001 he graduated from St. Petersburg State Transport University with a degree in «Railway rolling stock». Work experience – 5 years. At present he works as assistant Electric traction department of PSTU. He has 5 scientific papers.

#### **Telichenko Stanislav**

Was born in 1989. In 2013 he graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in "Electric transport of railroad". He has 8 years of work experience. At present he works as a senior lecturer of Electric operation department of PGUPS. He has 5 publications in peer-reviewed journals, 3 certificates of registration of computer software program.

# Об основных направлениях развития экологически чистого тягового подвижного состава

// On the main direction of development eco-friendly traction rolling stock //

**Зарифьян А.А., к.т.н.,**  
**ОП ООО «ТМХ Инжиниринг»,**  
**КБ «Городской транспорт», Санкт-Петербург**

**Киселев И.Г., д.т.н., профессор,**  
**Третьяков А.В., д.т.н., профессор,**  
**ПГУПС, Санкт-Петербург**

**Обухов М.Ю.,**  
**Моторвагонное депо**  
**Санкт-Петербург-Финляндский,**  
**Санкт-Петербург**

*Цель данной статьи – обзор основных путей развития тягового подвижного состава, направленных на повышение его экологичности. Применяется комплексный анализ современных концепций экологически чистого подвижного состава. Полученные данные могут служить базой для реализации проекта по созданию экологически чистого подвижного состава. Разработанная концепция позволит эффективно подбирать элементную базу и режимы работы для гибридного МВПС, исходя из анализа участков его обращения.*

*Ключевые слова:* экологичный тяговый подвижной состав, накопители энергии, гибридный подвижной состав, водородные топливные элементы.

В настоящее время перед современной наукой стоит задача снижения расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и, как следствие, снижение загрязнения окружающей среды парниковыми газами. Существенным источником загрязнения является транспорт, в том числе и железнодорожный. Железнодорожный автономный подвижной состав, использующий в своей конструкции двигатели внутреннего сгорания, имеет обширный углеродный след, что является причиной для поиска альтернативных вариантов силовых установок, обеспечивающих движение поезда с минимальными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу или с их полным отсутствием.

## Структура потребления топливно-энергетических ресурсов

Годовое потребление российских железных дорог составляет около 23 млн. т условного топлива (рис. 1) [1]. Как видно, 45%

*The purpose of this article is to review the main ways of development of traction rolling stock aimed at improving its environmental friendliness. A comprehensive analysis of modern concepts of environmentally friendly rolling stock is applied. The data obtained can serve as a basis for the implementation of a project to create an environmentally friendly rolling stock. The developed concept will make it possible to effectively select the element base and modes of operation for a hybrid EMU, based on the analysis of its circulation areas.*

*Keywords:* eco-friendly traction rolling stock, energy storage, hybrid rolling stock, hydrogen fuel cells.

энергетического баланса составляет потребление электроэнергии на тягу поездов (42,7 млрд. кВт·ч). Локомотивы, которые получают электрическую энергию из контактной сети (электровозы), являются неавтономными. Расходы дизельного топлива на тягу составляют 30% (2,4 млн. т), автономные локомотивы (тепловозы) оснащены тепловым двигателем, как правило, дизелем.

## Выбор основных направлений развития экологически чистой тяги

Наряду с экономическим фактором большое значение имеет и экологический аспект. Согласно современным тенденциям, необходимо обеспечить декарбонизацию железнодорожной тяги и тем самым сокра-

тить выброс парниковых газов. ОАО «РЖД» в ближайшем будущем планирует отказаться от закупок дизельных локомотивов [2]. С 2025 года компания планирует закупать только электровозы, а также тяговый подвижной состав, работающий на природном газе и других альтернативных источниках энергии. Расчетная потребность РЖД в приобретении локомотивов с 2021 по 2025 год составляет 2,522 тыс. единиц, при этом процент износа инвентарного парка на этот период в основном составит 57%.

«При сроке службы подвижного состава до 40 лет мы практически приблизимся к идеальному состоянию, когда 50% парка является достаточно молодым по возрасту», – заявил заместитель генерального директора – главный инженер ОАО «РЖД» С.А. Кобзев.

Ведущие мировые производители подвижного состава выбрали два основных направления развития экологически чистой тяги: снижение выброса углекислоты и полное исключение выброса в соответствии с классификацией на рис. 2.

Полная электрификация железных дорог имеет преимущества: высокая мощность, доступная для тяги, и, как следствие,

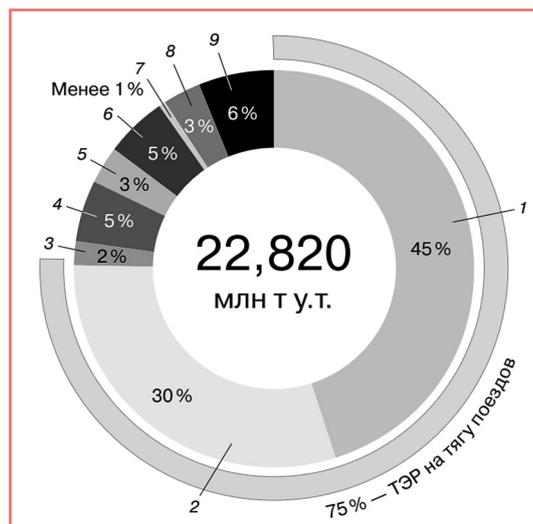


Рис. 1. Топливный баланс в ОАО «РЖД» в 2018 г.: 1 – электрэнергия на тягу поездов (42,7 млрд. кВт·ч); 2 – дизельное топливо на тягу поездов (2,4 млн. т); 3 – дизельное топливо в стационарной энергетике (0,144 млн. т); 4 – уголь (704 тыс. т); 5 – мазут топочный (289 тыс. т); 6 – газ природный (489 млн. м³); 7 – бензин автомобильный (24 тыс. т); 8 – тепловая энергия со стороны (2,3 млн. Гкал); 9 – электрэнергия в стационарной энергетике (5,8 млрд. кВт·ч)

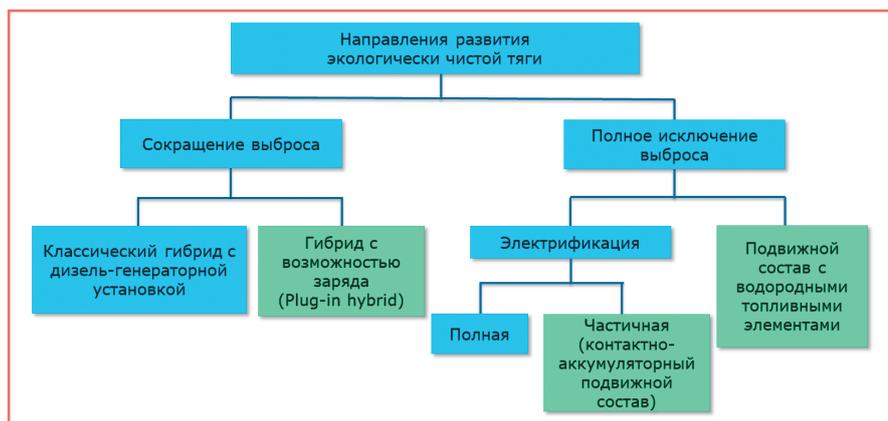


Рис. 2. Классификация подвижного состава по типу выброса

возможность реализации наибольшей скорости и силы тяги, возможность рекуперации энергии торможения, безопасность. Но имеются и недостатки: очень высокая стоимость создания инфраструктуры, включающей в себя как саму контактную сеть, так и подстанции и электростанции, высокие потери энергии в контактной сети. Стоит отметить, что экологический потенциал контактной сети может быть перечеркнут использованием энергии, выработанной на тепловых электростанциях, работающих на ископаемом топливе.

Для работ на участках, электрифицированных только частично, актуальным является контактно-аккумуляторный подвижной состав, способный работать как от контактной сети, так и от накопителя энергии. Кроме того, использование накопителей энергии позволяет снизить пиковое потребление из контактной сети, что актуально для городского транспорта, питающегося от постоянного тока (метро, городские поезда).

Широко используемым методом для снижения расхода топлива автономных локомотивов является применение гибридного тягового привода с электрохимическим накопителем энергии, который позволяет снизить мощность силовой установки и использовать её в оптимальном, с точки зрения потребления топлива, режиме. В настоящий момент актуальной является разработка гибридного подвижного состава с возможностью заряда накопителей энергии от внешнего источника энергии на остановках (Plug-in hybrid).

Новый путь для развития экологически чистого подвижного состава открывает использование водородных топливных элементов.

### Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз

Одним из проектов ОАО «РЖД» совместно с ТМХ и «Роснано» является создание маневрового электровоза для крупных железнодорожных вокзалов Москвы, Санкт-Петербурга и курортов Северного Кавказа [3]. Опытный экземпляр такого локомотива РЖД должны получить

в 2022 году для проведения всесторонних испытаний, и, в случае подтверждения заявленных технико-экономических показателей, начнется его внедрение на железнодорожных вокзалах мегаполисов. По сравнению с традиционными маневровыми тепловозами, они демонстрируют отсутствие выхлопов, радикальное снижение шума при работе и позволяют снизить воздействие тягового парка на окружающую среду.

Такой маневровый электровоз представляет собой полуавтономный контактно-аккумуляторный локомотив [4], который обеспечивает следующие режимы работы:

- тяга от контактной сети постоянного тока напряжением 3000 В;
- тяга от бортового накопителя энергии;
- зарядка бортового накопителя энергии от контактной сети постоянного тока напряжением 3000 В через штатные токоприемники (в процессе движения электровоза и при его стоянке);
- зарядка от общепромышленных источников электроэнергии напряжением 380 В и частотой 50 Гц.

### Водородный поезд

ОАО «РЖД» совместно с Трансмашхолдингом ведёт разработку первого в России поезда, работающего на водородных топливных элементах. Стоит отметить, что опытный образец подвижного состава на водородной тяге должен быть создан в России не позднее 2024 года. Такое поручение содержится в утвержденном Правительством Плане мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» [5].

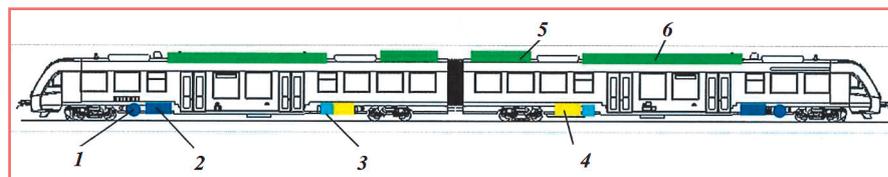


Рис. 3. Расположение оборудования на поезде Coradia iLint:

- 1 – тяговый электродвигатель; 2 – тяговый инвертор и DC-DC преобразователь;  
3 – вспомогательный преобразователь; 4 – накопитель энергии (тяговые литий-ионные батареи);  
5 – водородные топливные элементы; 6 – водородный топливный резервуар

В качестве примера подвижного состава на водородной тяге приведем основные параметры регионального поезда Coradia iLint [6], производимого фирмой Alstom (рис. 3). На крыше установлены баллоны с водородом и топливные элементы. В топливном элементе водород взаимодействует с кислородом, в результате чего вырабатывается электрическая энергия. При этом в качестве продукта электрохимической реакции в окружающую среду выделяется водяной пар.

Поезда Coradia iLint поставляются в двухвагонной составности, общей массой 119 т, всего имеется 156 мест для сидения. Скорость до 140 км/ч, заявляемый запас хода до 800 км. Резервуар, расположенный на крыше, вмещает 180 кг водорода, заправка длится около 15 минут. Мощность водородных топливных элементов составляет 2×200 кВт. Каждый вагон оснащен одним тяговым двигателем мощностью 272 кВт.

Литий-ионные накопители энергии используются совместно с топливными элементами в процессе тяги, энергия рекуперативного торможения полностью утилизируется накопителем. Испытания поезда на железных дорогах Германии показали, что средний расход водорода составляет 0,25 кг/км.

В настоящее время ОАО «РЖД» совместно с администрацией Сахалинской области, АО «Трансмашхолдинг» и ГК «Росатом» реализует проект по созданию водородного поезда с гибридной схемой тягового привода – водородных топливных элементов и накопителя энергии [2, 5, 7, 8]. Пилотным полигоном внедрения технологии выбран остров Сахалин, где, благодаря поддержке правительства области, формируется водородный инфраструктурный кластер с полным технологическим циклом от производства водорода до его применения, вокруг которого будет сформирована инновационная и образовательная среда. Планируется, что к 2023 году будет внедрено семь таких поездов, к 2030 году – тринадцать.

### Гибридный подвижной состав с возможностью заряда

При проектировании автономного подвижного состава, как с дизельной, так и с водородной силовой установкой, наиболее эффективным решением представляется использование гибрида на основе литий-ионных накопителей энергии. По сравнению

с суперконденсаторами (рис. 4), литий-ионные накопители имеют меньшую стоимость, большую плотность энергии и имеют удовлетворимую мощность заряда и разряда. Мощность заряда/разряда обуславливается кратностью тока, которая у накопителей на основе технологии NMC составляет от 2 до 5 С. Таким образом, литий-ионный [9, 10] накопитель, выбранный исходя из требуемой мощности, имеет достаточную ёмкость, чтобы считать его дополнительным источником энергии для тяги, который можно восполнить от внешнего источника на конечной остановке. Такой сценарий использования накопителя энергии на подвижном составе называют гибридом с возможностью заряда, либо Plug-in hybrid.

Сравним сценарии использования накопителя на примере гибридного рельсового автобуса с дизель-генераторной установкой и литий-ионными накопителями энергии на участке Санкт-Петербург – Выборг (через Приморск) – 170 км. На рис. 5 показаны результаты компьютерного моделирования движения поезда [12–18].

В сценарии а) работы силовой установки разряд накопителя не превышает

5%, таким образом, зарядка накопителя от внешнего источника не требуется. Во втором случае б) разряд накопителя составляет 40% от полной ёмкости. Восполнить 40% ёмкости накопителя возможно менее чем за час от внешнего источника. В результате, расчётный расход дизельного топлива в случае а) составил 338 кг, в случае б) – 289 кг, то есть экономия топлива за счёт истощения заряда накопителя равна 14,5%.

Предварительный анализ участка эксплуатации гибридного подвижного состава с планированием заряда накопителя на конечных станциях позволит значительно сократить расход топлива 676, и как следствие – снизить выброс в атмосферу. Использование технологии Plug-in hybrid справедливо также и для поездов с водородной силовой установкой, так как позволяет снизить расход водорода, имеющего высокую стоимость.

**Выводы**

Современные экологичные концепции подвижного состава позволяют осуществлять перевозочный процесс с минимальным негативным воздействием на

окружающую среду. Рассмотрены основные направления развития экологически чистого железнодорожного транспорта.

Гибридный привод с накопителями энергии позволяет снизить выбросы подвижного состава независимо от основного типа питания: от контактной сети, от дизель-генераторной установки, от водородных топливных элементов. Заряд накопителя энергии на конечных остановках позволяет значительно сократить использование топливно-энергетических ресурсов на тягу и, как следствие, снизить углеродный след, образующийся в процессе деятельности железной дороги.

**Литература**

1. Липидус Б.М. Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте / Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 5. – С. 274–283.
2. Потаева К. Тяга к экологии [Текст] / К. Потаева, А. Зубов // Гудок. – 2021. – № 17 (27111) – 3 февраля. – С. 4.
3. <https://www.rusnano.com/about/press-centre/news/20190606-rosnano-rzd-i-transmashkholding-zaklyuchili-soglasheniye-o-sozdaniigibridnykh-lokomotivov>.
4. Андриященко А.А. Анализ вариантов тяговой системы маневрового контактно-аккумуляторного электровоза / А.А. Андриященко, А.А. Зарифьян (мл), Н.В. Романченко, Т.З. Талахадзе, С.М. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство», Том 2. Технические науки. – Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. – с. 57–60.
5. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Утверждён Правительством РФ 12.10.2020 г. № 2634-р.
6. <https://hydraul.appstate.edu/conferences>.
7. Карасев Д.А. Водородная и аккумуляторная тяга: проекты ТМХ / Д. А. Карасев// Техника железных дорог – М.: НП «ОПЖТ», 2020. – 6 ноября.
8. Назаров Дм. Российский поезд на водороде – далекая мечта или близкая реальность? / GazWorld, № 72, 2019. – С. 20–24.
9. Обухов М.Ю. Повышение энергоэффективности электропоезда за счет установки накопителей электрической энергии / М. Ю. Обухов, Н.П. Калинин// Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 449–464.
10. Евстафьев А.М. Гибридные системы тягового привода / А. М. Евстафьев, И.Ю. Евстафьев // Интеллектуальные системы на транспорте сборник материалов V Международной науч. – практич. конференции. – СПб.: ПГУПС, 2015. – С. 363–366;
11. Обухов М.Ю. Применение гибридного моторвагонного подвижного состава с накопителями энергии в пригородном сообщении / М.Ю. Обухов, И.П. Викулов// Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического под-



Рис. 4. Сравнение литий-ионных накопителей и суперконденсаторов

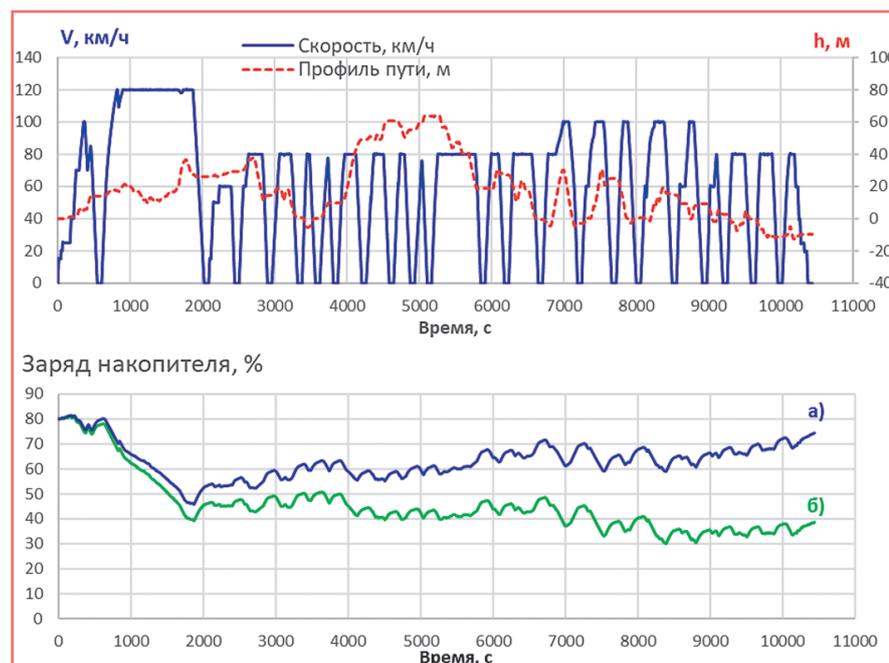


Рис. 5. Результат компьютерного моделирования движения поезда на участке Санкт-Петербург – Выборг (через Приморск)

вижного скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: материалы VIII Междунар. симпозиума «Элтранс-2015», 7–9 октября 2015 г., г. Санкт-Петербург. – СПб.: ПГУПС, 2017. – С. 336–343.

12. Обухов М.Ю. Повышение энергоэффективности гибридного моторвагонного подвижного состава/ М.Ю. Обухов, И.П. Викулов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – СПб.: ПГУПС, 2017. – С. 320–324.

13. Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности гибридного локомотива /А.М. Евстафьев// Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 6–10.

14. Евстафьев А.М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе / А.М. Евстафьев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 3. – С. 27–38.

15. Титова Т.С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Ч. 1 / Т.С. Титова, А.М. Евстафьев, М.Ю. Изварин, А.Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. Журн. о науке, практике, экономике. – 2018. – № 6 (79). – С. 40–42.

16. Титова Т.С. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии / Т.С. Титова, А.М. Евстафьев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2017. – Вып. 2. – С. 200–210.

17. Евстафьев А.М. Оценка энергоёмкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава / А.М. Евстафьев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 2. – С. 7–17.

18. Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности гибридного локомотива / А.М. Евстафьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 6–10.

#### **Зарифьян Александр Александрович**

Родился в 1991 году. В 2013 году окончил ЮРГТУ (НПИ) по специальности «Управление и информатика в технических системах».

Кандидат технических наук. В 2016 году защитил диссертацию по теме «Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянно-го тока». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает экспертом отдела тяговых систем в ООО «ТМХ Инжиниринг». Имеет 11 научных трудов, 1 патент.

#### **Киселев Игорь Георгиевич**

В 1963 году закончил механический факультет Ленинградского института 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 «Теплотехника и теплосиловые установки» ПГУПС. Имеет 410 научных трудов, 38 патентов. Почётный железнодорожник, Заслуженный работник высшей школы.

#### **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.

#### **Обухов Михаил Юрьевич**

Родился в 1995 году. В 2017 году окончил ПГУПС по специальности «Подвижной состав железных дорог». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает инженером I-й категории Моторвагонного депо Санкт-Петербург-Финляндский. Имеет 8 научных трудов.

#### **Zarifyan Alexander**

Was born in 1991. In 2013 he graduated from SRSTU(NPI) of the Department of Automation and Telemechanics. Candidat of technical sciences. In 2016 he defended his thesis on the topic "Increasing the energy efficiency of passenger electric locomotives with an asynchronous traction drive when powered from a DC network". Work experience is 8 years. At present he is expert of the traction systems department of TMH Engineering LLC. He has 11 scientific papers, 1 patent.

#### **Kiselev Igor**

In 1963 he graduated from the Department of Mechanics of Leningrad Institute of Railway Engineers. Doctor of technical 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. At present he works as a professor at the Department of Heat Engineering and Heat Power Plants of PGUPS. He has 410 scientific publications, 38 patents. Honorary railway worker, Honored worker of the higher school.

#### **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 cars in operation". Work experience is 45 years. At present he is a professor at the Department "Cars and Wagon Economy" of PGUPS. He has 126 scientific papers, 10 patents.

#### **Obukhov Mikhail**

Was born in 1995. In 2017 he graduated from the Faculty of Transport and Energy Systems of PGUPS. Work experience is 8 years. At present he works as an engineer of the motor car depot St. Petersburg-Finlyandsky. He has 8 scientific papers.

# Полупроводниковые системы регулирования возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением

// Semiconductor field control systems for DC traction motors with series excitation //

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

Рязанов Ю.В.,  
ООО «НПО «Сатурн», Санкт-Петербург

*Ослабление возбуждения – один из самых распространённых, недорогих и легко реализуемых способов регулирования скорости тяговых электродвигателей постоянного тока. Двигатели постоянного тока широко распространены в различных отраслях, в том числе нашли применение на железнодорожном транспорте, благодаря ряду преимуществ, таких как простота конструкции и управления. В настоящее время приводом постоянного тока оборудована значительная часть действующих электропоездов и электропоездов, а также оснащаются некоторые новые модели. Существуют различные системы ослабления возбуждения, каждая из которых имеет достоинства и недостатки. Современные полупроводниковые устройства позволяют совершенствовать электронные системы регулирования возбуждения и существенно повышать защиту тяговых двигателей во нештатных ситуациях при работе в режиме ослабления поля. Ключевые слова: двигатель постоянного тока, электронные системы регулирования возбуждения, электронные шунты, IGBT-транзистор.*

В настоящее время в мире наблюдается тенденция по массовой замене тягового электропривода постоянного тока на электропривод с бесколлекторными тяговыми электродвигателями, как на железнодорожном транспорте, так и на других самоходных машинах. В частности, практически все новые электропоезда и электропоезда имеют тяговый привод либо с асинхронными, либо с синхронными двигателями, причем в последних все более часто используются постоянные магниты. Однако огромное количество действующих единиц имеют привод с двигателями постоянного тока, как правило,

*Excitation attenuation is one of the most common, inexpensive and easily implemented ways to control the speed of DC traction motors. DC motors are widely used in a variety of industries, including rail applications, due to a number of advantages such as simplicity of design and control. Currently, a significant part of the existing and some new models electric locomotives and electric trains is equipped with a direct current drive. There are various field control systems, each of which has advantages and disadvantages. Modern semiconductor devices make it possible to improve electronic excitation control systems and significantly increase the protection of traction motors in emergencies when operating in the magnetic field attenuation mode.*

*Keywords: DC traction motor, electronic field control systems, electronic shunts, IGBT transistor.*

с последовательным или смешанным возбуждением. Имея несколько неоспоримых достоинств, он устанавливается даже на новых электропоездах и электропоездах в России. Учитывая расчетный и фактический срок службы подвижного состава, можно предположить, что он будет применяться еще как минимум 30–50 лет. Основными достоинствами тягового привода с двигателями постоянного тока являются:

- простота конструкции;
- высокий к.п.д.;
- стойкость к излучениям и ряду других внешних воздействий в случае отсутствия преобразователя;

• возможность резервирования при использовании преобразователей.

В подавляющем большинстве на железнодорожном подвижном составе в России для регулирования скорости с двигателями постоянного тока в режиме тяги используется либо регулирование напряжения, либо регулирование сопротивления в цепи якорей и ослабление возбуждения. Эффективность данных систем управления значительно ниже, чем самих тяговых двигателей. Конструкция тягового двигателя последовательного возбуждения за последнее столетие не претерпела значительных изменений, достигла определенного совершенства, в то время как система управления имеет значительные резервы в этом плане.

Одним из способов регулирования скорости разнообразных транспортных машин с тяговыми двигателями постоянного тока является регулирование магнитного поля является регулирование магнитной последовательной обмотки возбуждения сопротивлением. При этом часть тока якоря протекает по шунтирующему резистору, ток возбуждения снижается, падает э.д.с. вращения, что в свою очередь вызывает рост якорного тока и увеличение вращающего момента. Процессы, протекающие в электродвигателе постоянного тока в таком режиме, хорошо известны и подробно описаны в [1, 2, 3] и многих других источниках.

Ослабление возбуждения позволяет поддержать мощность электродвигателя при пуске и разгоне, так как она уменьшается по мере увеличения скорости при прямом подключении к источнику питания (двигатель работает в соответствии с так называемой естественной, или автоматической характеристикой) [4]. Следует отметить, что ослабление возбуждения – один из самых экономичных и легко реализуемых способов управления скоростью таких двигателей и повсеместно применяется на железнодорожном подвижном составе [5]. К сожалению, при использовании такой схемы на мощных электроприводах при переходных процессах в питающей сети неизбежно возникает бросок якорного тока из-за нескомпенсированной индуктивности обмотки возбуждения, что может вывести двигатель из строя. Традиционно для исключения этого явления использовались

индуктивные шунты, включаемые вместе с сопротивлениями и представляющие собой индуктивные реакторы с большой массой, габаритами и высокой стоимостью.

### Система ослабления возбуждения с индуктивным шунтом

Данная схема (рис. 1) получила наиболее широкое распространение на ЭПС магистральных железных дорог. При такой системе последовательно с резистором включается дополнительно мощная силовая катушка индуктивности (реактор), называемая «индуктивный шунт».

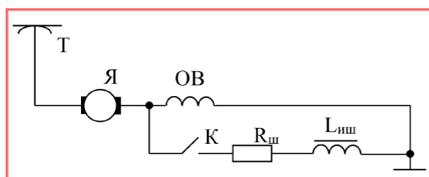


Рис. 1. Система ослабления возбуждения с индуктивным шунтом:  
Т – токоприемник; Я – обмотка якоря; ОВ – обмотка возбуждения; К – контактор;  
R<sub>ш</sub> – шунтирующий резистор;  
L<sub>шш</sub> – шунтирующий реактор (индуктивный шунт)

Данное устройство предназначено для компенсации индуктивности обмотки возбуждения. При резком нарастании тока полные сопротивления цепи возбуждения и цепи ослабления возбуждения оказываются примерно равны, вследствие чего глубокого ослабления возбуждения не происходит.

Такая система достаточно хорошо защищает тяговые электродвигатели, но имеет существенные недостатки: большой вес, большое количество цветного металла на обмотку шунта, высокую стоимость. Кроме того, схема с индуктивным шунтом не обеспечивает стопроцентную защиту от броска тока.

В 1960-х годах на Новочеркасском электровозостроительном заводе (НЭВЗ) была попытка создания электровоза с резистивной цепью ослабления возбуждения, без индуктивного шунта, с использованием быстродействующей релейной защиты, однако она оказалась неудачной.

Начиная с 1970-х гг. было предпринято несколько успешных попыток замены индуктивных шунтов полупроводниковыми приборами, показавших эффективность с точки зрения обеспечения режимов работы и защиты тяговых электродвигателей. В данном контексте можно упомянуть ряд работ А.С. Мазнева, в которых с целью защиты использовались тиристоры [6, 7, 8]. Системы эксплуатировались на электропоездах ЭР2, электровозах ВЛ-15А и ряде других подвижных единиц постоянного тока с напряжением 3 кВ. Имелись и другие схемотехнические решения.

Несмотря на то, что любая электронная система ослабления возбуждения пред-

усматривает параллельное подключение полупроводниковых приборов к обмоткам возбуждения, работают они по-разному.

С точки зрения принципа действия системы можно подразделить следующим образом (рис. 2):

Импульсное ослабление возбуждения используется достаточно давно, однако, как правило, эта система используется, если есть основной тяговый преобразователь, а ослабление возбуждения является дополнительной функцией. Полупроводниковые приборы работают в режиме широтно-импульсной модуляции, регулирование тока возбуждения осуществляется плавно (в частности, электропоезд ЭР 200).

Электронные шунты также предусматривают подключение резистора осла-

в одном устройстве несколько функций. Так, IGBT – электронный шунт может обеспечить как ступенчатое регулирование ослабления возбуждения, так и плавное, при этом уровень защиты становится значительно выше, чем у традиционной системы с индуктивными шунтами.

### Система ослабления возбуждения с тиристорным шунтом

Данная система позволяет отключить режим ослабления возбуждения при снятии напряжения контактной сети, т.е. существенно уменьшить бросок тока и момента ТЭД. Принципиальная схема системы ослабления возбуждения приведена на рис. 3.



Рис. 2. Существующие электронные системы регулирования возбуждения тяговых электродвигателей

бления возбуждения с помощью одного или нескольких полупроводниковых приборов, однако регулирование осуществляется ступенчато, по аналогии с контакторами. Соответственно и регулирование ступенчатое, а основной функцией системы является защита. Электронный шунт по схеме существенно проще импульсного преобразователя, хотя большей частью это касается тиристорных схем.

Усиление поля – редко используемый режим, при котором ток возбуждения больше тока якоря – это может понадобиться для реализации очень больших тяговых усилий при малой скорости, что характерно для промышленного транспорта и горного профиля пути. Для реализации этого режима необходимо более сложное устройство, и на настоящий момент реализованы только схемы с преобразователями – электромашинным или статическим полупроводниковым.

Широкое развитие технологии IGBT-транзисторов позволяет совместить

Схема работает следующим образом.

В начальный момент времени включаются контактор ослабления возбуждения и тиристор (тиристор включается специальным блоком управления путем подачи одиночного управляющего импульса). При отрыве токоприемника от контактной сети в обмотках возбуждения ТЭД образуется э.д.с. самоиндукции, являющаяся встречной для тиристора. При этом тиристор запирается, и при последующем

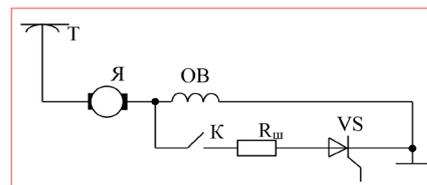


Рис. 3. Система ослабления возбуждения с тиристорным шунтом:  
Т – токоприемник; Я – обмотка якоря;  
ОВ – обмотка возбуждения; К – контактор;  
R<sub>ш</sub> – шунтирующий резистор; VS – шунтирующий тиристор (тиристорный шунт)

восстановлении контакта токоприемника двигатель оказывается подключенным на полное возбуждение. Недостатком такой системы является отсутствие защиты от наброса напряжения в контактной сети.

**Система ослабления возбуждения с управляемым тиристорным шунтом и с коммутирующим конденсатором**

Данная система позволяет отключить режим ослабления возбуждения при снятии напряжения контактной сети, т.е. существенно уменьшить бросок тока и момента ТЭД, и дополнительно к этому обеспечить отключение режима ослабления возбуждения при набросе напряжения в контактной сети. Принципиальная (упрощенная) схема системы ослабления возбуждения приведена на рис. 4.

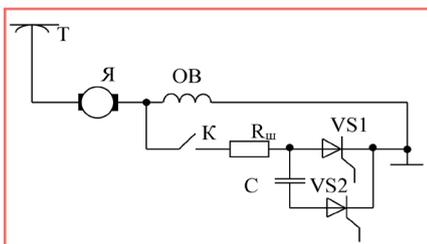


Рис. 4. Система ослабления возбуждения с шунтирующим резистором и управляемым тиристорным шунтом:  
Т – токоприемник; Я – обмотка якоря;  
ОБ – обмотка возбуждения;  
К – контактор; R<sub>ш</sub> – шунтирующий резистор;  
VS1 – шунтирующий тиристор (тиристорный шунт); VS2 – коммутирующий тиристор;  
С – коммутирующий конденсатор

Схема работает следующим образом.

В начальный момент времени включаются контактор ослабления возбуждения и тиристор (тиристор включается специальным блоком управления путем подачи одиночного управляющего импульса). При отрыве токоприемника от контактной сети в обмотках возбуждения ТЭД образуется э.д.с. самоиндукции, являющаяся

встречной для тиристора. При этом тиристор запирается, и при последующем восстановлении контакта токоприемника двигатель оказывается подключенным на полное возбуждение. Недостатком такой системы является отсутствие защиты от наброса напряжения в контактной сети. При набросе напряжения, броске тока в якоре по сигналу от датчиков включается тиристор VS2, что приводит к выключению VS1 приложением обратного напряжения от предварительно заряженного конденсатора С. Система (рис. 5) была предназначена для установки на электропоезда ЭР1, ЭР2 и выпускалась ХК Ленинец «Экспериментальный завод» в 1998–2002 гг. Недостатки: сложность схемы и системы управления, необходимость установки датчиков. При гололеде на контактной сети машинист фактически не мог использовать ослабленное поле, так как оно сразу же снималось, хотя степень защиты оказывалась даже выше, чем с индуктивным шунтом. Тем не менее, система успешно эксплуатировалась на электропоездах серии ЭР2к, выходов из строя тяговых двигателей не наблюдалось. Перечисленных недостатков лишена система с транзистором IGBT в цепи шунтирования, так как её быстродействие выше, цепи коммутации не требуются.

**Тиристорный шунт электровоза ВЛ-15А**

Для ослабления возбуждения на электровозе ВЛ-15А использована схема ослабления возбуждения с тиристорным шунтом (ТШ) вместо индуктивного шунта (ИШ). Для этого в цепь ослабления возбуждения силовой схемы электровоза введены дополнительно тиристоры VS1-VS4, добавочные резисторы Rd1- Rd4 (разработка ПГУПС). Принципиальная схема включения тиристорных шунтов на секции В электровоза ВЛ-15 № 006 показана на рис. 6 (приведенная схема соответствует включению тиристорных шунтов тяговых электродвигателей (ТЭД) № 1 и 2). На остальных ТЭД включение тиристорных шунтов произведено аналогично.

Тиристорный шунт, состоящий из тиристора VS1, добавочного резистора Rd, импульсного трансформатора Тi1 и защитного диода VD1 образует цепь ослабления возбуждения тяговых двигателей ТЭД1 и 2.

Схема работает следующим образом.

При постановке рукоятки контроллера машиниста (КМ) в положение ходовой позиции, а вспомогательной рукоятки ослабления возбуждения – в положение I, замыкается контактор К25. После включения контактора от блока управления на управляющий электрод тиристора VS1 через разделительный импульсный трансформатор Тi1 подается серия прямоугольных импульсов длительностью 0,8 с. Это приводит к отпиранию тиристора, в результате чего через цепь шунта начинает протекать ток, пропорциональный соотношению сопротивления цепи шунтирования и обмоток возбуждения. Это приводит к снижению основного магнитного потока тяговых электродвигателей и росту тока якоря.

Защитные функции шунта заключаются в том, что при снижении напряжения на входе схемы до 0 (отрыв токоприёмника) в обмотках возбуждения создаётся э.д.с. самоиндукции, которая запирает включённый тиристор, в результате чего ослабление возбуждения снимается. Этим исключается аварийный режим – прямое включение двигателя с цепью шунтирования обмоток возбуждения через активное сопротивление.

При протекании постоянного тока через обмотки возбуждения ТЭД 1–2 падение напряжения составляет 8–10 В. Падение напряжения в обмотках возбуждения ТЭД 3 и ТЭД 4 ещё меньше, так как каждая из них подключена к индивидуальному шунту, и составляет 4–5 В. Так как цепь ослабления возбуждения подключается к значительной индуктивности, то скорость нарастания тока в тиристоре VS1-VS4 при его отпирании будет очень мала. Поэтому для устойчивого отпирания тиристора ослабления возбуждения на управляющий электрод каждого из них необходимо подавать не одиночный импульс,



Рис. 5. Внешний вид тиристорного шунта (подвагонное исполнение)

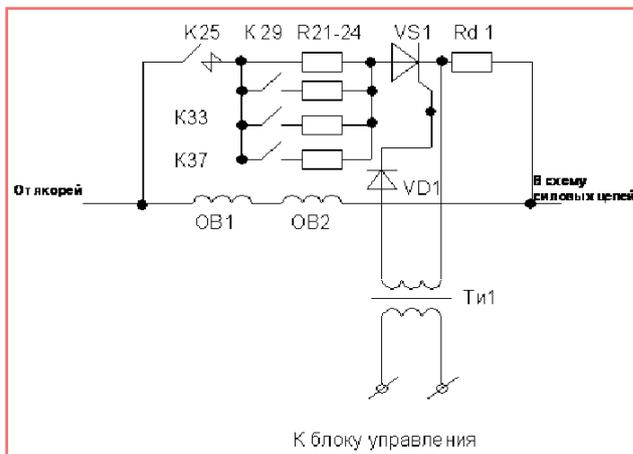


Рис. 6. Тиристорный шунт электровоза ВЛ-15А

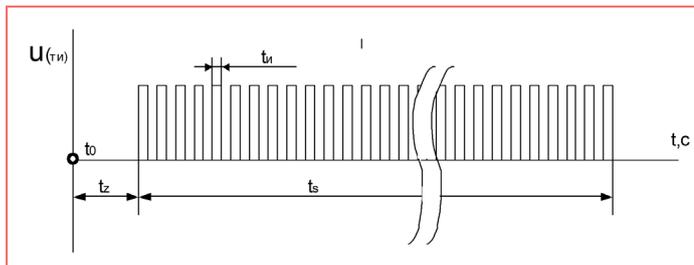


Рис. 7. Параметры импульсного сигнала на выходе блока управления

а серию (гребёнку) импульсов. Опытным путем установлено, что для устойчивого отпирания тиристоров необходима гребёнка импульсов продолжительностью 0,5–1 с, частота повторения импульсов – 400 Гц (рис. 7).

В момент времени  $t_0$  включается контактор К25 (для ТЭД 1–2, для остальных ТЭД – соответствующие контакторы). В этот момент на вход блока управления подается напряжение цепей управления электровоза через последовательно включённые нормально разомкнутые блокировки контакторов К25, К26, К27, К28. Интервал времени задержки  $t_z$  (0,3 с) необходим для обеспечения заряда конденсаторов на входе блока управления от напряжения цепей управления 50 В и для гарантированного включения силовых контактов контакторов.

В любом случае, проблема низкого напряжения, сравнимого с пороговым напряжением тиристоров и прямым падением напряжения коллектор-эмиттер IGBT-транзисторов, и большой индуктивности, затрудняющие включение и устойчивую работу, требует особого внимания при создании подобных систем для электровозов и других машин с тяговыми двигателями, имеющими низкоомную обмотку возбуждения. Может потребоваться не только особый алгоритм управления, но и специфические требования к силовым приборам. На электропоездах в большинстве случаев прямое падение напряжения превышает 30 В и конструктивно системы более простые.

### Электронный шунт электровоза ВЛ-80С и ВЛ80Т

Развитие IGBT-технологий привело к тому, что использование тиристоров для электронного шунта стало менее целесообразным и в ряде случаев более дорогим. Для обеспечения защиты двигателей во всех режимах, а не только при отрыве токоприемника, при использовании однооперационных тиристоров необходимо применять коммутирующий узел, что фактически делает стоимость шунта сравнимой со стоимостью импульсного преобразователя. IGBT-транзистор позволяет выполнить все необходимые для защиты функции, значительно расширяя диапазон регулирования силы тяги без бросков тока [9].

Работы по оборудованию электровозов ВЛ80С были проведены в 2009–2011 гг.

В результате работ была создана система, существенно улучшающая защиту тяговых электродвигателей (рис. 8).

Система работает следующим образом: при включении силового транзистора создается цепь для протекания тока ТЭД параллельно обмотке возбуждения. Регулирование степени ослабления возбуждения осуществляется путем переключения ступеней резисторов (на схеме не показаны), либо изменением глубины ШИМ (коэффициента заполнения) при работе транзистора VT в импульсном режиме. Отрыв токоприемника от контактной сети, либо наброс напряжения фиксируются датчиком напряжения (ДН), сигнал от которого поступает на БУЭШ. Последний быстро снижает коэффициент заполнения, либо вообще отключает силовой транзистор VT, в результате чего двигателя переходят в режим полного возбуждения. За счет анализа соотношения токов якоря и возбуждения, степень ослабления возбуждения поддерживается на заданном уровне независимо от режима. Это позволяет избежать входа тяговых электродвигателей в недопустимый режим глубокого ослабления возбуждения с большим

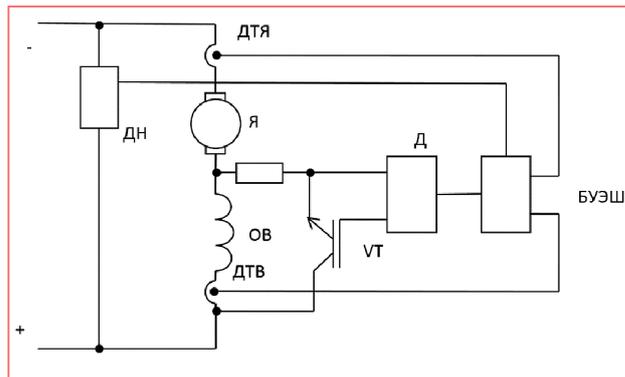


Рис. 8. Принципиальная схема системы ослабления возбуждения на электровозах ВЛ-80С и ВЛ-80Т:

VT – IGBT-транзистор; Я – якорь; ОВ – обмотка возбуждения; ДТЯ – датчик тока якоря; ДТВ – датчик тока возбуждения; Д – драйвер; ДН – датчик напряжения; БУЭШ – блок управления электронным шунтом

током якоря, а следовательно и повреждению коллектора.

На рис. 9 приведены осциллограммы переходных процессов в двигателе при отрыве токоприемника от контактной сети – наиболее критичного режима.

Именно в этом случае наиболее часто возникает повреждение коллектора или круговой огонь.

На осциллограммах видно, что за счет активного регулирования снижается бросок тока якоря, а после окончания переходного процесса двигателя переходят в рабочий режим с ослаблением возбуждения. Пульсации токов якорей и возбуждения объясняются мостовой схемой выпрямления, применяемой на этом электровозе.

На рис. 10 представлен аналогичный случай, но в этой ситуации активного регулирования недостаточно, так как возникает риск повреждению коллектора из-за глубокого ослабления возбуждения и требуется полное отключение этого режима. При этом величина тока якоря не превышает 500 А.

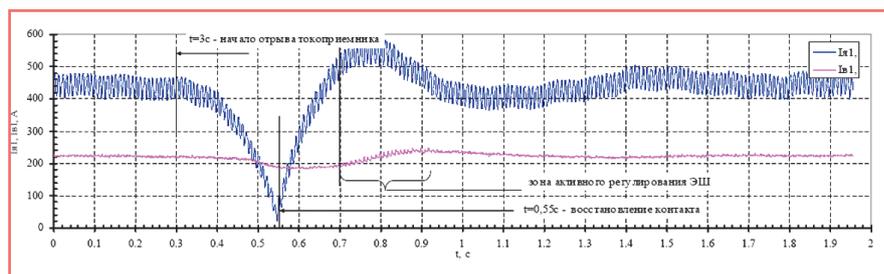


Рис. 9. Осциллограммы токов тягового двигателя при отрыве токоприемника от контактной сети

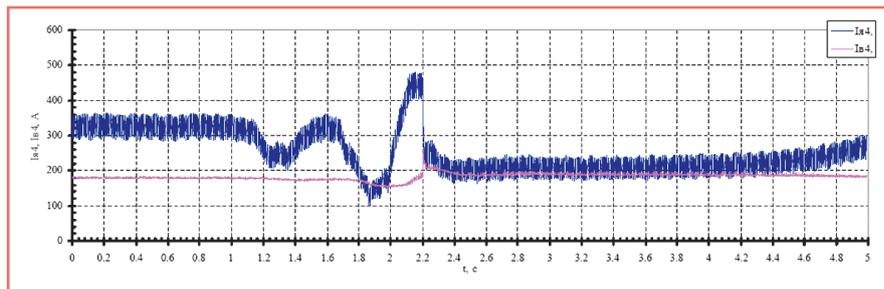


Рис. 10. Работа электронного шунта в режиме отрыва токоприемника от контактной сети, с полным снятием режима ослабления

### Литература

1. Подвижной состав электрифицированных железных дорог: Теория работы электрооборудования. Электр. схемы и аппараты. [Учебник для вузов ж.-д. трансп.] / Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
2. Плакс А.В. Системы управления электрическим подвижным составом: Учебник / А.В. Плакс. – Москва: Маршрут, 2005. – 358 с. – ISBN5890353039.
3. Теория электрической тяги: [учеб. для вузов ж.-д. трансп.] / С.И. Осипов, С.С. Осипов, В.П. Феоктистов; под ред. С.И. Осипова. – Москва: Маршрут, 2006. – 433 с.
4. Тяговые электрические машины: Учебник / В.Г. Щербаков, А.Д. Петрушин, Б.И. Хоменко [и др.]. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 644 с.
5. Системы управления тяговым приводом современных локомотивов / А.Т. Бурков, О.С. Валинский, А.М. Евстафьев [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 33–36.
6. Мазнев А.С. Электропоезд ЭР2 с тиристорной системой ослабления возбуждения / А.С. Мазнев, О.И. Шатнев, К.В. Марченко // Локомотив. – № 3. – 2001. – с. 29–30.
7. Мазнев А.С. Электронные системы регулирования возбуждения для электрического подвижного состава / А.С. Мазнев, О.И. Шатнев, А.М. Евстафьев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2007. – № 3(27). – С. 12–17.

8. Мазнев А.С. Совершенствование системы регулирования возбуждения для электропоездов / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев // Вестник транспорта Поволжья. – 2008. – № 2(14). – С. 4–10.

9. Анализ способов и технических средств ослабления поля тяговых электродвигателей электропоездов переменного тока / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, С.В. Власьевский // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 2. – С. 411–415.

#### **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 – 31 год. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 40 научных трудов.

#### **Волов Алексей Викторович**

Родился в 1993 году. В 2016 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Подвижной состав железных дорог». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает ассистентом в ПГУПС. Имеет 5 печатных работ.

#### **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 – 25 лет. В настоящее время работает генеральным директором ООО «НПО «Сатурн». Имеет 3 патента на полезную модель.

#### **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 31 years of work experience. At present he works as associate professor Electric traction department of St. Petersburg State Transport University. He has more than 40 scientific papers.

#### **Volov Aleksey**

Was born in 1993. In 2016 he graduated from St. Petersburg State Transport University with a degree in «Railway rolling stock». Work experience – 5 years. At present he works as assistant Electric traction department of PSTU. He has 5 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 – 25 years. At present he is general manager of «NPO «Saturn» LLC. He has 3 patents for utility model.

# Исследование алгоритмов защиты от юза и боксования тягового подвижного состава

// Research of algorithms of protection spinning of wheel of tractive rolling stock //

Викулов И.П., к.т.н.,  
Сычугов А.Н., Андреев В.Е.,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

Современный электроподвижной состав оборудован микропроцессорной системой управления тяговым электроприводом и плавным бесконтактным регулированием напряжения на тяговых электродвигателях, что позволяет реализовывать гибкие алгоритмы защиты от процессов боксования (юза). Несвоевременное обнаружение и локализация процессов боксования (юза) приводит к снижению тяговых (тормозных) усилий, повреждению колесно-моторного блока, повышенному износу колес и рельсов. Разработана имитационная модель электроподвижного состава с коллекторным тяговым электроприводом и плавным зонно-фазовым регулированием напряжения на тяговых электродвигателях, при помощи которой проводится исследование алгоритмов защиты от процессов боксования (юза) в режиме тяги и рекуперативного торможения. Модель содержит блоки системы Matlab и пакета расширения Simulink: блок тягового трансформатора, блоки тяговых двигателей, блок элементов цифровой системы автоматического управления тяговым электроприводом, блоки датчиков токов и напряжений, блоки вывода результатов моделирования. Рассмотрены алгоритмы защиты от процессов боксования (юза), локализация которых происходит за счет снижения токов якорей тяговых двигателей боксующей (юзующей) колесной пары. В режиме тяги снижения токов якорей производится за счет воздействия на регулятор тока якорей тяговых электродвигателей, в режиме рекуперативного торможения – на регулятор тока возбуждения группы тяговых электродвигателей с юзующей колесной парой. Рассмотренные алгоритмы защиты позволяют эффективно локализовать процессы боксования (юза) с минимальной потерей тяговых (тормозных) усилий.

**Ключевые слова:** электрический подвижной состав, коллекторный тяговый двигатель, система автоматического управления, зонно-фазовое регулирование напряжения, боксование, юз, алгоритмы защиты, имитационное моделирование.

Modern electric rolling stock is equipped with a microprocessor control system of traction electric drive and smooth contactless voltage regulation on traction motors, which allows to implement flexible skidding (wheel-locking) protection algorithms. Untimely detection and localization of skidding (wheel-locking) processes leads to decrease traction (brake) forces, damage wheel-motor unit, increase wear of wheels and rails. The simulation model of electric rolling stock with dc-motor electric drive and smooth zone-phase voltage regulation is developed, on which skidding (wheel-locking) protection algorithms in the mode of traction and regenerative braking is conducted research. The model contains MATLAB and Simulink extension package blocks: traction transformer, dc traction motors, digital automatic control system of traction electric drive, current and voltage sensors, unit of simulation results output. Skidding (wheel-locking) protection algorithms is discussed. The localization of this processes is due to the anchors current reduction of traction motors with skidding (wheel-locking) wheelset. In the traction mode the anchors current reduction is due to impact on the anchors current regulator of traction motors and in the regenerative braking mode is due to impact on the exciting current regulator of traction motors group with wheel-locking wheelset. The considered protection algorithms allow to effectively localize the processes of skidding (wheel-locking) with a minimum decrease traction (braking) forces.

**Keywords:** electric rolling stock, dc motor, automatic control system, zone-phase voltage regulation, skidding, wheel-locking, protection algorithm, model of traction electric drive, simulation model.

Ухудшение условий сцепления колесной пары и рельса приводит к развитию процессов боксования (юза) в режимах тяги и электрического рекуперативного торможения. Для устойчивой реализации максимальных сил тяги и торможения необходимо принять специальные меры по предотвращению избыточного проскальзывания колесных пар в режиме тяги и избыточного замедления колесной пары в режиме торможения [1, 2].

Способы ликвидации процессов боксования (юза) изучены довольно глубоко и нашли достаточно полное отображение в научно-технической литературе [3–5].

Исследование процессов боксования (юза) непосредственно на подвижном составе сопряжено с неизбежным повреждением поверхности катания колесных пар, с понижением эксплуатационного ресурса подвижного состава и дополнительным расходом материальных средств на проведение эксперимента.

Компьютерное моделирование позволяет без больших материальных затрат выработать алгоритмы работы системы автоматического управления (САУ), обеспечивающие эффективную локализацию процессов боксования (юза).

Основу существующего парка ЭПС ОАО «РЖД» составляют электровозы и электропоезда с коллекторным тяговым приводом. Наибольший интерес представляют современные электровозы переменного тока серий ЭП1, 2ЭС5К, а также электропоезда переменного тока серии ЭД9Э, которые оборудованы микропроцессорной САУ тяговым электроприводом и плавным зонно-фазовым регулированием напряжения на тяговых электродвигателях (ТЭД), что позволяет реализовать гибкие алгоритмы защиты электропривода от процессов боксования (юза), а также следящую систему контроля скольжения колесных пар.

Уравнения движения электроподвижного состава (ЭПС) и колесных пар при избыточном скольжении в ходе процесса боксования имеют следующий вид:

$$F_{cy} = \frac{1}{N_{oc}} P\Psi_0 K_{\Psi} (\Delta V_{ck}); \quad (1)$$

$$V_{ck} = \omega_k R_k - V_{ЭПС}; \quad (2)$$

$$V_{кп} = \begin{cases} V_{ЭПС}, & \text{если } F_{cy} > F_m \text{ и } V_{ck} < 0,1 \text{ м/с;} \\ V_{нб} + \frac{1}{m_{кпб}} \int (F_m - F_{cy}) \cdot dt, & \text{если } F_{cy} < F_m; \\ \text{либо при } F_{cy} > F_m \text{ и } V_{ck} \geq 0,1 \text{ м/с;} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{ЭПС} = \frac{1}{m_{эн}(1+\gamma)} \int \left( \sum_{i=1}^{i=n} F_{mi} + \sum_{j=1}^{j=N_{oc}-n} F_{cu_j} - W_0 \right) \cdot dt. \quad (4)$$

Уравнения движения ЭПС и колесных пар при избыточном замедлении в ходе процесса юза имеют следующий вид:

$$V_{зам} = V_{ЭПС} - \omega_k R_k; \quad (5)$$

$$V_{кн} = \begin{cases} V_{ЭПС}, & \text{если } F_{cu} > F_{мор} \text{ и } V_{зам} < 0,1 \text{ м/с}; \\ V_{тоз} - \frac{1}{m_{кнб}} \int (F_{мор} - F_{cu}) \cdot dt, & \text{если } F_{cu} < F_{мор}; \\ \text{либо при } F_{cu} > F_{мор} \text{ и } V_{зам} \geq 0,1 \text{ м/с}; \end{cases} \quad (6)$$

$$V_{ЭПС} = V_{ЭПС0} - \frac{1}{m_{эн}(1+\gamma)} \int \left( \sum_{i=1}^{i=n} F_{мор_i} + \sum_{j=1}^{j=N_{oc}-n} F_{cu_j} + W_0 \right) \cdot dt, \quad (7)$$

где:

- $F_m$  – сила тяги колесных пар;
- $F_{мор}$  – сила торможения колесных пар;
- $F_{cu}$  – сила сцепления колесных пар с рельсами;
- $P$  – вес порожнего моторного вагона;
- $\Psi_0$  – потенциальный коэффициент сцепления;
- $V_{ск}$  – скорость избыточного скольжения колесных пар;
- $V_{зам}$  – скорость избыточного замедления колесных пар;
- $V_{эн}$  – поступательная скорость движения ЭПС;
- $V_{энсо}$  – скорость начала торможения ЭПС;
- $V_{нб}$  – поступательная скорость движения ЭПС, при которой начинается боксование колесной пары;
- $V_{тоз}$  – поступательная скорость движения ЭПС, при которой начинается юз колесной пары;
- $\omega_k R_k$  – угловая скорость вращения и радиус колеса колесных пар по кругу катания;
- $Kv(\Delta V_{СК})$  – характеристика сцепления;
- $m_{кнб}$  – эквивалентная масса вращающихся частей колесно-моторного блока;
- $m_{эн}$  – масса ЭПС;
- $1 + \gamma$  – приведенный коэффициент инерции вращающихся частей;
- $N_{oc}$  – число осей секции или моторного вагона ЭПС;
- $W_0$  – основное сопротивление движению ЭПС;
- $\sum_{i=1}^{i=n} F_{mi}$  – суммарная сила тяги  $n$  небоксующих колесных пар;
- $\sum_{j=1}^{j=N_{oc}-n} F_{cu_j}$  – суммарная сила тяги ( $N_{oc}-n$ ) боксующих колесных пар;
- $\sum_{i=1}^{i=n} F_{мор_i}$  – суммарная сила торможения  $n$  неюзующих колесных пар;
- $\sum_{j=1}^{j=N_{oc}-n} F_{кум_j}$  – суммарная сила торможения ( $N_{oc}-n$ ) юзующих колесных пар.

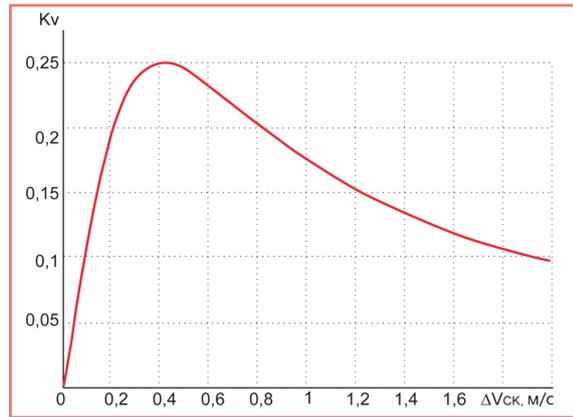


Рис. 1. Зависимость коэффициента сцепления от величины скольжения колесной пары

Характеристика сцепления задается в соответствии с кривой, приведенной на рис. 1 [6].

Поддержание неизменной силы тяги (торможения) на ободах колесных пар интенсифицирует процессы развития боксования (юза), обуславливая рост частоты вращения колесных пар с ускорением, существенно превышающим ускорение движения ЭПС. Повысить коэффициент сцепления колесных пар возможно за счет формирования соответствующего воздействия на регуляторы САУ режима тяги и торможения для снижения электромагнитного момента на валах ТЭД с целью восстановления сцепления.

Функциональные требования к защите от боксования (юза) можно сформулировать следующим образом:

1. Быстрое выявление скольжения колесных пар тележки.
2. Быстрое снижение токов якорей ТЭД. Выполнять это необходимо с учетом постоянных времени передаточных функций САУ и устойчивости режимов работы электропривода. Особое внимание следует уделять режиму рекуперативного торможения.
3. Снижение тока ТЭД и его восстановление после ликвидации избыточного скольжения колесных пар при минимальной потере силы тяги на ободах колес за цикл боксования.
4. Снижение тока ТЭД и его восстановление после ликвидации избыточного замедления колесных пар при минимальной потере тормозной силы на ободах колес за цикл юза.

В качестве эффективного средства контроля избыточного скольжения рассматривается дискретное устройство контроля скольжения ДУКС 03, 04.

В устройствах ДУКС для формирования сигнала о наличии избыточного скольжения колесных пар используется разность минимальных (максимальных) в тяге (торможении) частот вращения колесных пар. Формирование команды на снижение силы тяги (торможения) на ободах колесных пар тележки происходит при разбалансе скоростей колесных пар 9–15% или

предельно-допустимом ускорении 1,5 м/с<sup>2</sup>.

Величина снижения силы тяги, которая необходима для ликвидации избыточного скольжения, определяется из известного уравнения движения колесной пары с учетом массы вращающихся частей колесно-моторного блока:

$$\Delta F = Km_s \frac{dV_{кн}}{dt}, \quad (8)$$

где  $\Delta F$  – величина снижения тягового (тормозного) усилия, Н;

$K$  – коэффициент снижения тока уставки ТЭД;

$dV/dt$  – ускорение колесной пары, м/с<sup>2</sup>.

Плавное восстановление начального значения силы тяги (торможения) после ликвидации избыточного скольжения колесных пар обеспечивается задатчиком интенсивности по пропорциональному закону.

Таким образом, реализуется следующий алгоритм работы защиты – при превышении избыточного скольжения контрольного порогового уровня (разница скоростей колесных пар достигает 15%) программным способом производится понижение пускового (тормозного) тока пропорционально ускорению боксующей (юзующей) колесной пары. При достижении разницы скоростей колесных пар уровня 9% сигнал о наличии боксования (юза) отменяется, и далее программным способом производится увеличение пускового (тормозного) тока темпом 100 А/с до величины предшествующей боксованию (юзу), либо до появления повторного сигнала боксования (юза). В случае появления повторного сигнала система отслеживает перемежающиеся сигналы возникновения боксования (юза) с частотой 10–50 Гц, с появлением которых САУ программным способом осуществляет постепенное уменьшение уставки тока боксующей (юзующей) колесной пары до отмены сигнала боксования (юза), затем с выдержкой 0,5 с производится повторное увеличение уставки тока якорей ТЭД.

Приведенный алгоритм защиты позволяет ликвидировать избыточные скольжения колесных пар, возникающие в процессе эксплуатации, с минимальной потерей тяговых и тормозных сил на ободах колес.

Исследование алгоритмов защиты производится с помощью имитационной модели силовых цепей и функциональных схем САУ электропоезда переменного тока ЭДЭЭ, показанных на рис. 2. Модели электропоезда в режиме тяги и рекуперативного торможения, разработанные в среде Matlab с приложением Simulink, более подробно рассмотрены в [7, 8].

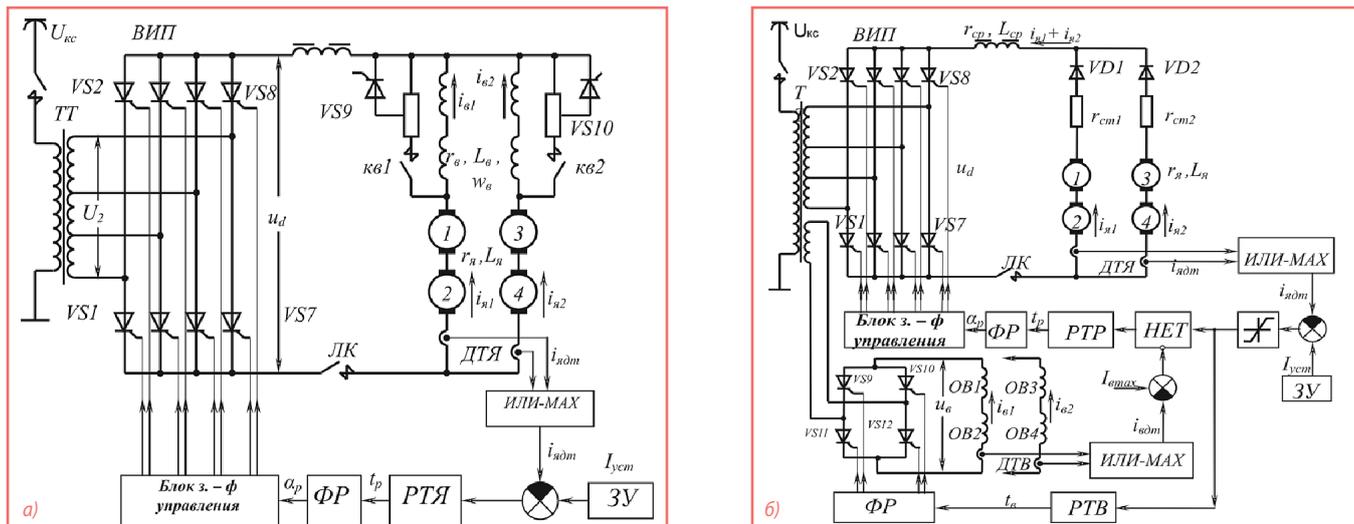


Рис. 2. Упрощенные схемы силовых цепей и функциональные схемы контуров режима тяги и рекуперативного торможения: а) режим тяги; б) режим рекуперативного торможения

Особенность моделей для исследования процессов боксования (юз):

- существует необходимость моделировать характеристику сцепления для каждой колесной пары ЭПС;
- требуется одновременно решать уравнение движения ЭПС совместно с уравнениями вращения колесных пар;
- необходимо на каждом шаге моделирования отслеживать величину скольжения колесных пар.

Практическая реализация модели боксования (юза) в среде Matlab с применением Simulink требует совместного применения блоков Simulink, используемых для разработки модели силовой части электропривода и системы управления, а также программ, написанных на m-языке Matlab, при расчете скоростей вращения колесных пар и движения ЭПС (уравнения (1) – (7)) на каждом шаге моделирования.

Имитационная модель, предназначенная для исследования алгоритмов защиты от процессов боксования (юза) колесных пар, показана на рис. 3.

Имитационная модель состоит из блоков, воспроизводящих характеристики источника питания, тягового трансформатора, выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП), тяговых электродвигателей, механической части ЭПС, датчиков тока и САУ [9 – 11].

На компьютерной модели проведены исследования эффективности работы данного алгоритма в режиме тяги и рекуперативного торможения.

Локализация процесса боксования производится снижением тягового тока посредством воздействия регулятора тока якорей (РТЯ) на ВИП.

В режиме тяги рассмотрено два способа обнаружения процесса боксования

двух колесных пар одной моторной тележки:

- вариант 1, боксование отслеживается только по разности скоростей колесных пар (рис. 4);
- вариант 2, боксование отслеживается по разности скоростей и угловых ускорений колесных пар (рис. 5).

Инициализация процесса боксования моделируется мгновенным понижением потенциального коэффициента сцепления  $\psi_0$  на 50% по отношению к номинальному.

Алгоритм эффективен в обоих случаях. Вариант 2 отслеживания процессов боксования предпочтителен благодаря быстрому обнаружению процесса боксования. Время обнаружения и ликвидации боксования в первом случае составляет 0,06 с и 0,2 с, во втором – 0,005 с и 0,09 с.

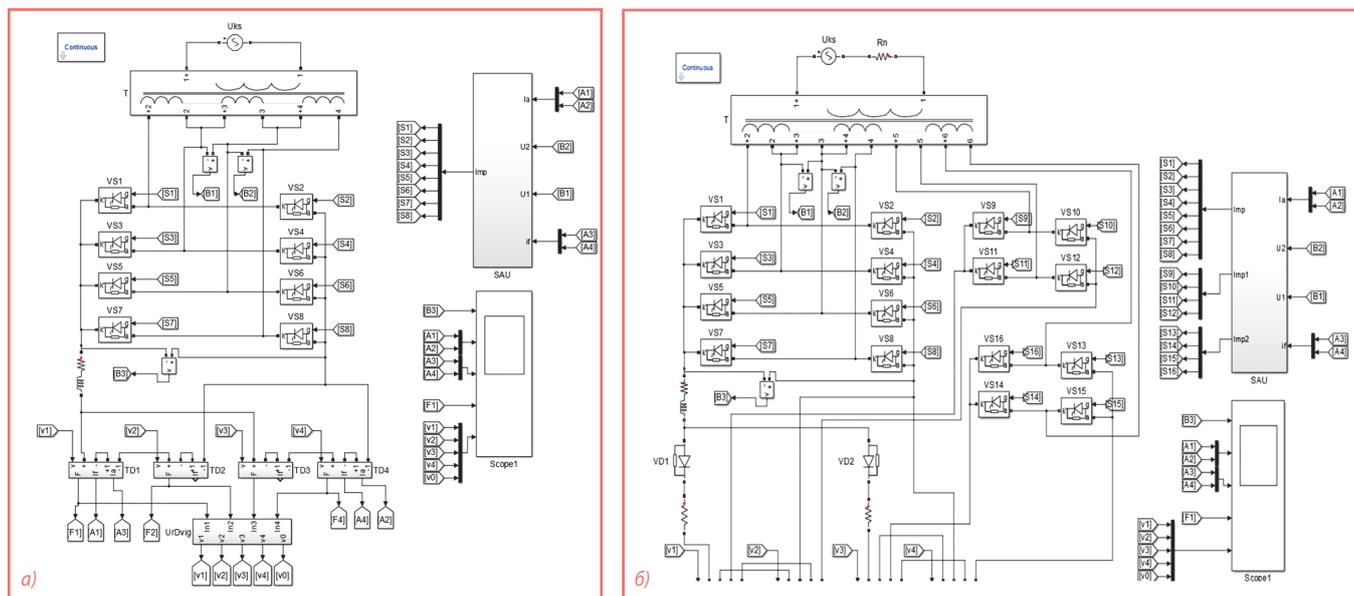


Рис. 3. Имитационная модель электропоезда переменного тока с защитой от боксования (юза) колесных пар: а) режим тяги; б) режим рекуперативного торможения

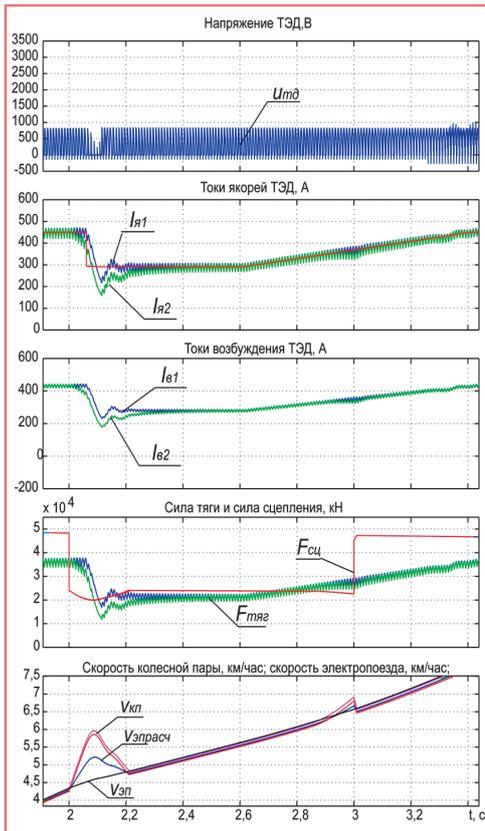


Рис. 4. Срабатывание защиты при буксовании. Вариант 1

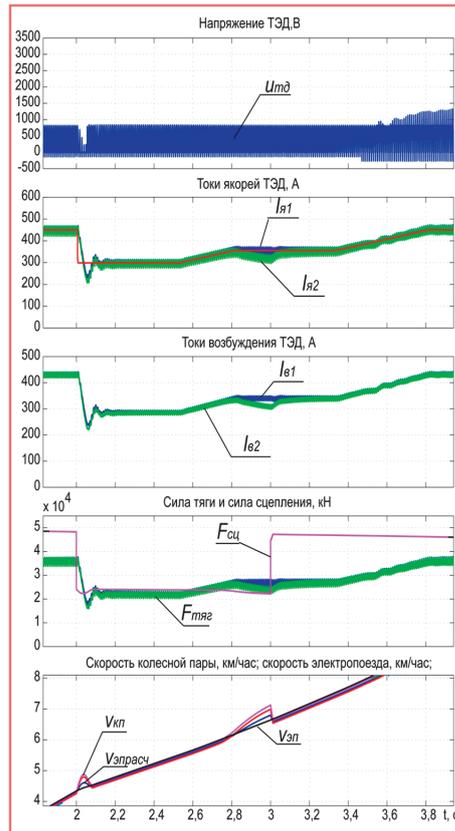


Рис. 5. Срабатывание защиты при буксовании. Вариант 2

Процессы юза исследованы на компьютерной модели для 2-х способов его локализации:

- локализация процесса юза снижением тормозного тока посредством воздействия регулятора тока рекуперации (РТР) на ВИП;
- локализация процесса юза избирательным снижением тока возбуждения группы двигателей с юзующей колесной парой за счет воздействия регулятора тока возбуждения (РТВ) на управляемый выпрямитель возбуждения (УВВ).

Регулятор РТВ у существующего электропоезда ЭД9Э производит регулирование токов возбуждения одновременно в обоих УВВ, что не позволяет реализовать потележечный способ регулирования тормозной силы (рис. 6а).

Для реализации второго способа локализации процесса юза (воздействием регулятором РТВ на ток рекуперации

группы ТЭД с юзующей колесной парой) необходимо применить два регулятора РТВ воздействующие на углы регулирования, соответственно, УВВ1 и УВВ2 (рис. 6б).

Однако результаты моделирования режимов рекуперации с двумя регуляторами РТВ показали, что вход в режим рекуперации сопровождается колебательным процессом. Устранение колебательности процесса входа возможно путем снижения коэффициентов усиления системы по отношению к расчетным (для системы с одним регулятором РТВ).

Для обеспечения высоких коэффициентов усиления и обеспечения потележечного регулирования тормозной силы разработаны алгоритмы работы САУ с одним регулятором РТВ в стационарных режимах и двумя регуляторами в режимах локализации процесса юза (рис. 6в).

Принцип работы регулятора РТВ в случае, показанном на рис. 6в, следующий:

в стационарном режиме на вход блоков РТВ1 и РТВ2 подается один и тот же сигнал  $(I_{уст} - I_{я1})$ , тогда на выходах регуляторов формируются углы регулирования  $\alpha_{рв1}$ ,  $\alpha_{рв2}$ . Сигналы регуляторов передаются в блок выравнивания нагрузок токов якорей, в котором при отсутствии сигнала о наличии одиночного юза, сигнал величины угла регулирования РТВ1  $\alpha_{рв1}$  передается в блок УВВ1, а в блок УВВ2 сигнал величины угла  $[\alpha_{рв1} + k(I_{я1} - I_{я2})]$ , осуществляя таким образом выравнивание токов по якорям ТЭД. При этом сигнал величины угла регулирования с выхода РТВ2  $\alpha_{рв2}$  заблокирован отсутствием сигнала об юзе (инверсией сигнала юза). В случае появления сигнала о наличии процесса юза на вход регулятора РТВ2 подается сигнал  $(I_{уст} - I_{я2} - \Delta_1)$  (где  $\Delta_1$  – величина снижения тока рекуперации группы с ТЭД с юзующей колесной парой). Далее после обработки регулятором сигнал величины угла регулирования  $\alpha_{рв2}$  передается в блок выравнивания нагрузок (механизм выравнивания токов якорей ТЭД заблокирован сигналом о наличии юза), после этого сигналы величин углов регулирования  $\alpha_{рв1}$  и  $\alpha_{рв2}$  передаются в УВВ1 и УВВ2. Таким образом, в режиме юза осуществляется потележечное регулирование тормозной силы.

На компьютерной модели произведено исследование эффективности локализации процессов юза понижением тормозного тока регулятором РТР и понижением тормозного тока группы ТЭД с юзующей колесной парой регулятором РТВ (рис. 7 и рис. 8).

Инициализация процесса юза моделируется аналогично режиму буксования мгновенным понижением потенциального коэффициента сцепления  $\psi_0$  на 50% по отношению к номинальному.

Два способа локализации процесса юза сопоставлены по времени ликвидации избыточного скольжения, максимальной величине скольжения колесных пар, тормозному замедлению до начала юза и в момент юза. Данные сопоставления сведены в таблицу 1.

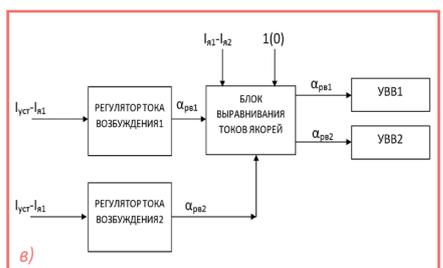
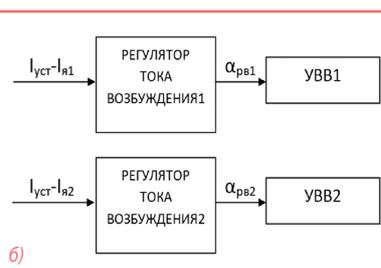
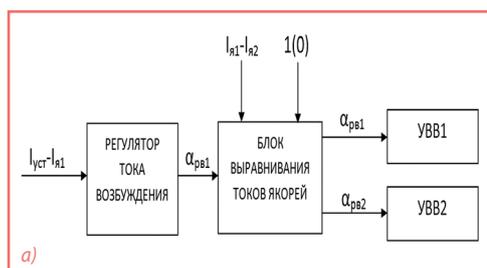


Рис. 6. Принципиальные схемы регулятора РТВ: а) один регулятор РТВ; б) два регулятора РТВ; в) один регулятор РТВ в стационарном режиме и два регулятора в режиме юза:  $I_{уст}$  – ток уставки тока рекуперации;  $I_{я1}$ ,  $I_{я2}$  – токи якорей групп ТЭД;  $\alpha_{рв1}$ ,  $\alpha_{рв2}$  – углы регулирования УВВ1 и УВВ2; 1(0) – сигнал о наличии юза колесной пары

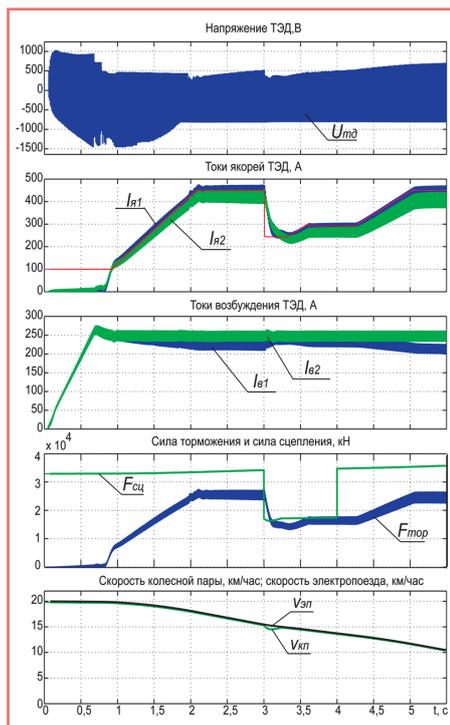


Рис. 7. Срабатывание защиты в режиме юза. Локализация процесса регулятором РТР

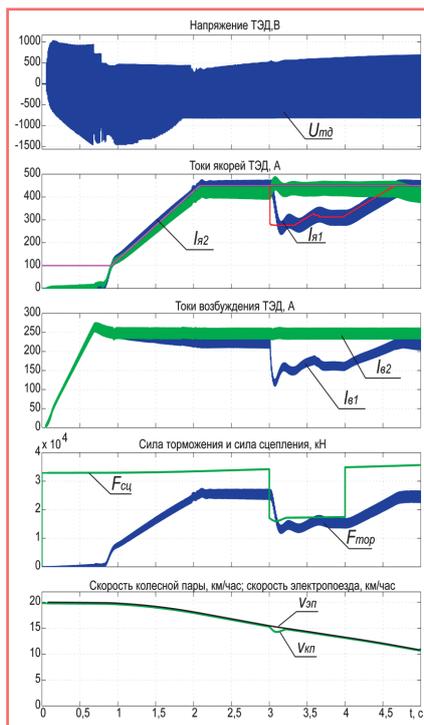


Рис. 8. Срабатывание защиты в режиме юза. Локализация процесса регулятором РТВ

Таблица 1. Сопоставление способов локализации юза

Параметры сопоставления	РТР	РТВ
1. Тормозное замедление: - до начала юза (с 2 по 3 секунду); - в момент юза (с 3 по 4 секунду)	0,8 м/с <sup>2</sup> 0,5 м/с <sup>2</sup>	0,8 м/с <sup>2</sup> 0,65 м/с <sup>2</sup>
2. Потеря тормозного замедления	37,5%	19%
2. Длительность локализации процесса	0,22 с	0,24 с
3. Максимальная величина скольжения колесных пар	4%	5%

### Выводы

Рассмотрены алгоритмы защиты от процессов боксования (юза), осуществляющие воздействие на регуляторы токов якорей в режиме тяги и на регуляторы тока рекуперации в режиме рекуперативного торможения. Также в режиме рекуперативного торможения для локализации процессов юза предусмотрена возможность использования регуляторов тока возбуждения.

Разработанные компьютерные модели позволяют выполнить анализ алгоритмов защиты от процессов боксования (юза) колесных пар ЭПС с зонно-фазовым регулированием напряжения ТЭД.

Результаты имитационного моделирования указывают на эффективность предложенных алгоритмов защиты как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения.

В результате сопоставления данных о ходе процесса локализации юза (таблица 1) наиболее эффективным, исходя из минимизации потерь тормозных сил, следует считать понижение тока рекуперации посредством воздействия на регулятор тока возбуждения группы ТЭД с юзующей колесной парой.

### Литература

- Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Повышение эффективности электроподвижного состава. Железнодорожный транспорт. 2010. № 9. С. 33–36.
- Логинов И.Я., Кожемяка Н.М. Исследование процессов развития и ликвидации избыточного скольжения колесных пар электропоезда ЭНЗ, Электровозостроение: Сб. науч. тр./ОАО «Всерос. н. и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»); Редкол.: Л.Н. Сорин (гл. ред.) и др. – Новочеркасск. – 2006. – Т. 50. – С. 169–179.
- Исаев И.П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. – М.: Транспорт. – 1970. – 182 с.
- Марков Д.П. Взаимосвязь коэффициента трения с проскальзыванием в условиях взаимодействия колеса с рельсом // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 3. С. 31–33.
- Вербек Г. Современное представление о сцеплении и его использовании // Железные дороги мира. – 1974. – № 4. С. 23–53.
- Сравнение концепций механической части трехфазного тягового привода. Железные дороги мира. – 2005. – N9. – С. 31–41.
- Математическая модель силовых цепей и системы автоматического управления электропоезда переменного тока: доклад А.Я. Якушев, И.П. Викулов. – // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием (19–21 мая 2005, Красноярск): в 2 т. / ИрГУПС и др. – Красноярск: Гротеск, 2005. – Т. 1. – С. 479–484.

- 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 ж.д.т.: Материалы 3-го Межд. симпозиума (3; СПб.; 15–17 нояб. 2005 г.). – СПб.: ПГУПС, 2007. – С. 588–593.
- А.М. Evstaf'ev, 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, Volume 88, Issue 10, pp.672–675
- Veiko V.P., Petrov A.A., Maznev A.S., Evstaf'ev A.M., Kalinina A.A. LASER RAIL CLEANING FOR FRICTION COEFFICIENT INCREASE Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering sponsors: Russian Federation Ministry of Education and Science, St. Petersburg State Univ. Inf. Technol., Mech. Opt., Russian Foundation for Basic Research, European Office of Aerospace Research and Development (EOARD), A.M. Prokhorov General Physics Institute. 2011. С. 799617.

### Викулов Илья Павлович

Родился в 1981 году. В 2004 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Усовершенствование алгоритмов управления тяговыми электродвигателями электропоезда переменного тока с зонно-фазовым регулированием». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 40 научных трудов.

### Сычугов Антон Николаевич

Родился в 1986 году. В 2009 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 40 научных трудов.

### Андреев Владимир Евгеньевич

Родился в 1970 году. В 1992 году окончил Петербургский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Опыт работы – 27 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС.

### Vikulov Ilya

Was born in 1981. In 2004 he graduated from the St. Petersburg State University of Railways with a degree in Communications Engineer – electromechanics. Candidate of Engineering Science. In 2009 he defended his thesis on the topic "Improvement of control algorithms for traction motors of an alternating current electric train with zone-phase control". Work experience is 15 years. At present he works as an associate professor of the "Electric traction" department of PGUPS. He has over 40 scientific publications.

### Sychugov Anton

Was born in 1986. In 2009 he graduated from the St. Petersburg State University of Railway Engineering with a degree in Communications Engineer – electromechanics. Work experience is 11 years. At the present he works as a senior lecturer of the "Electric traction" department of PGUPS. He has more than 40 scientific papers.

### Andreev Vladimir

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 is an associate professor of "Electric traction" department in PGUPS.

# Моделирование механических напряжений в обмотках тяговых электродвигателей тепловозов

// Modeling of mechanical stresses in the windings of traction electric motors of diesel locomotives //

Курилкин Д. Н., к. т. н., доцент,  
Шрайбер М. А., к. т. н., доцент,  
Романова А. А., к. т. н., доцент,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Изменение температуры обмоток вызывает механические напряжения в проводниках и изоляции электрических машин, особенно пропитанных различными составами, что в большинстве случаев имеет место в современных тяговых электродвигателях тепловозов. Хотя проектировщики ищут новые методы охлаждения, которые обеспечивают повышение удельной мощности и эффективности работы электрической машины, постоянные термические циклы приводят к усталости и ухудшению качества изоляции обмоток. В статье были рассмотрены возможности повышения надежности работы тяговых электродвигателей тепловозов путем замены пропиточного лака Элимпрег-993ЭП на кремний-органический компаунд Элпласт-180 ИД. Результаты моделирования показывают, что такая замена способна существенно снизить термомеханические напряжения, возникающие в обмотках тяговых электродвигателей тепловозов.*

*Ключевые слова:* тепловоз, тяговый электродвигатель, изоляция проводников.

Стремительное развитие отечественного локомотивостроения привело к повышенному спросу на тяговые электрические машины с высокой удельной мощностью и высоким КПД, в том числе тяговые электродвигатели (ТЭД) тепловозов. Это представляет проблему не только с точки зрения электромагнитной конструкции машины, но и с точки зрения ее теплового расчета и напряженного состояния изоляции проводников. Более высокие температуры и механические напряжения приводят к ускоренному старению изоляции и повреждению электрической машины [1].

Одним из основных источников теплоты в ТЭД являются электрические и механические потери мощности. В простейшем случае охлаждения ТЭД теплота, производимая в проводниках, передается через изоляцию

*A change in temperature causes mechanical stresses in the windings of electric machines, especially those impregnated with various compositions, which in most cases occurs in modern traction motors of diesel locomotives. While designers are looking for cooling methods that increase the power density and efficiency of an electrical machine, constant thermal cycles lead to fatigue and degraded winding insulation. The article discusses the possibilities of increasing the reliability of the traction electric motors of locomotives by replacing the Elimpreg-993EP impregnating varnish with the Elplast-180 ID silicone-organic compound. The results show that such a replacement is capable of significantly thermomechanical stress arising in the windings of traction electric motors of diesel locomotives.*

*Keywords:* diesel locomotive, traction motor, conductor insulation.

в материал сердечника, затем передается охлаждающему воздуху с последующей конвекцией в окружающую среду. Охлаждение

обычно усиливается за счет увеличения площади поверхности охлаждения и повышения коэффициента теплопередачи. Современные ТЭД имеют обмотки, пропитанные специальными лаками. Обычно это делается, с одной стороны, для улучшения теплоотвода, а с другой – для предотвращения прямого контакта изоляционных материалов с воздухом, что, в свою очередь, предотвращает проникновение влаги в изоляционное покрытие. Однако несоответствие между коэффициентами теплового расширения изоляционного материала, стали сердечников и медных проводов может привести к термически индуцированным механическим напряжениям в обмотках, что в долгосрочной перспективе приведет к разрушению изоляции как самого слабого, с точки зрения механической прочности, компонента электрической машины.

Хотя механическое напряжение, вызванное термической нагрузкой, широко изучалось для корпусов силовой электроники и некоторых других областей [2], для тяговых электрических машин локомотивов не найдено сколь-нибудь существенных исследований в этом направлении. Одна из причин может заключаться в том, что основное внимание при исследовании старения изоляции уделялось тепловому разрушению [3]. Однако пропитка изоляции обмоток специальными составами имеет относительно гораздо более серьезные последствия из-за разницы в коэффициентах расширения, поскольку пропиточный материал обычно имеет более высокий коэффициент теплового расширения по сравнению с медью и сталью сердечников (таблица 1) [4]. Это представляет необходимость всестороннего изучения таких напряжений.

Таблица 1. Параметры электротехнических материалов

Материал	Коэффициент линейного расширения материала, $10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$	Предел прочности на сжатие, МПа
Электротехническая сталь	12,0	350
Медь	16,5	220
Компаунд Элпласт-180 ИД (отвержденный)	14,0	120
Гетинакс	24,0	190
Пропиточный лак Элимпрег-993ЭП (отвержденный)	32,4	86
Текстолит	35,0	160

### Численная модель

Термомеханические напряжения в изоляции обмотки якоря из-за тепловой нагрузки в настоящей работе исследуется на примере ТЭД типа ЭДУ-133 с помощью трехмерного анализа методом конечных элементов.

В пазы якоря уложена простая петлевая обмотка. Она состоит из 54 катушек и имеет изоляцию класса F. Обмотка якоря имеет шаг по пазам 1–14, шаг по коллектору 1–2. Катушка обмотки якоря состоит из четырех элементарных одновитковых секций. Каждая секция, в свою очередь, состоит из трех параллельных проводников, расположенных по высоте паза, а четыре витка, входящих в катушки, располагаются по ширине паза, т.е. осуществлена горизонтальная укладка. В собранном виде расчетный фрагмент якоря с уложенной в пазы обмоткой представлен на рис. 1.

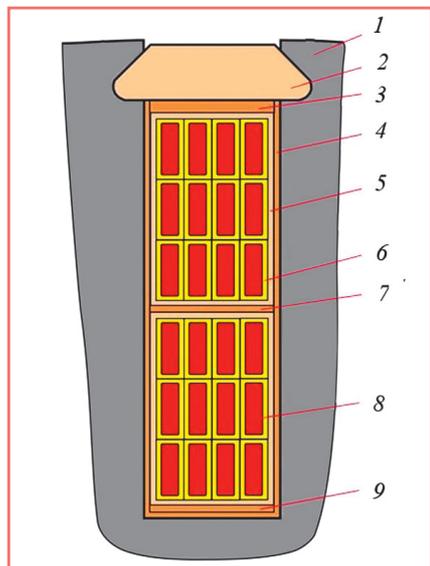


Рис. 1. Разрез паза якоря:  
1 – сердечник статора, 2 – клин, 3, 7, 9 – прокладки, 4 – защитная стеклотента, 5 – корпусная изоляция, 6 – изоляция проводников, 8 – проводник

В пазовой части катушка изолирована тремя слоями 5 стеклослюдянистой ленты ЛС-ЭП толщиной 0,1 мм, намотанной в половину нахлеста. Каждый проводник 8 покрывается изоляцией 6 из одного слоя стеклослюдянистой ленты толщиной 0,1 мм. В задних лобовых частях дополнительно между элементарными секциями устанавливают прокладки из стеклотенты. Передние лобовые части дополнительно имеют между витками секции прокладки из слюды, чтобы избежать витковых замыканий при осадке и бандажировке обмотки. Концы катушек в изгибах дополнительно изолируются одним слоем полиамидной пленки ПМА толщиной 0,04 мм. На дне паза, между катушками и под клин устанавливают прокладки 3, 7, 9 из стеклотекстолита 0,35 мм. Обмотка якоря удерживается, в пазах стеклотекстолитовыми, клиньями 2 толщиной 6 мм, в лобовых частях – стеклобандажами.

Конечноэлементная трехмерная термомеханическая модель в среде SolidWorks расчетного сектора якоря представлена на рис. 2.

Моделирование напряженного состояния изоляции в пазу электрической машины производилось для двух вариантов исполнения:

- изоляция изготовлена из стеклоткани в несколько слоев толщиной 0,1 мм, пропитанной лаком Элимпрег-993ЭП;
  - изоляция изготовлена из стеклоткани в несколько слоев толщиной 0,1 мм, пропитанной кремний-органическим компаундом Элпласт-180 ИД.
- В процессе выполнения расчетов принимались следующие допущения:
- изоляция представляет собой монолитную конструкцию без дополнительных включений и пустот;
  - все технологические операции изготовления электрической машины выполнялись при температуре 20°C, т.е. в этой точке отсутствуют внутренние напряжения;
  - нагрев всех элементов конструкции электрической машины равномерный;
  - проводники паза при тепловом расширении имеют возможность свободно перемещаться в продольном направлении, не вызывая дополнительного термомеханического напряжения.

### Расчет механических напряжений в изоляции

Термически индуцированное механическое напряжение в обмотке якоря ТЭД в основном зависит от температуры и коэффициента теплового расширения материалов (медь, изоляция, и электротехническая сталь). При моделировании коэффициенты теплового расширения всех материалов принимались согласно [5]. Таким образом, единственным изменяемым фактором, влияющим на механические напряжения в изоляции проводников,

является распределение температуры в элементах конструкции ТЭД.

Комбинированные термомеханические модели, разработанные для выполнения этого исследования, состоят из двух составляющих, так что сначала рассчитывается распределение температуры по всему объему якоря ТЭД путем решения тепловой модели [6], а затем вычисленная температура используется в качестве входных данных в термомеханической модели при расчете механических напряжений в изоляции обмотки.

Влияние температуры на механические напряжения в изоляции проводников якоря учитывается в модели путем реализации уравнения (1), которое определяет тепловую деформацию  $\delta_i$  [7]:

$$\delta_i = a_v \Delta T, \quad (1)$$

где  $a_v$  – коэффициент линейного расширения материала, 1/°C;

$\Delta T$  – разница температуры между исходным и расчетным состоянием ТЭД, °C.

Положительное значение  $\delta_i$  означает, что объект расширяется, а отрицательное значение  $\delta_i$  означает, что объект сжимается.

Механические напряжения в изоляции обмотки якоря получены для распределения температуры, полученного в случае штатного воздушного охлаждения элементов ТЭД. Расчетная схема вычисления напряжений представлена на рис. 3.

Эквивалентное механическое напряжение в изоляции обмотки якоря рассчитывается как [8]:

$$\sigma_e = \sqrt{0,5 \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения, действующие вдоль соответствующих осей, МПа;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  – касательные напряжения, действующие вдоль соответствующих плоскостей, МПа.

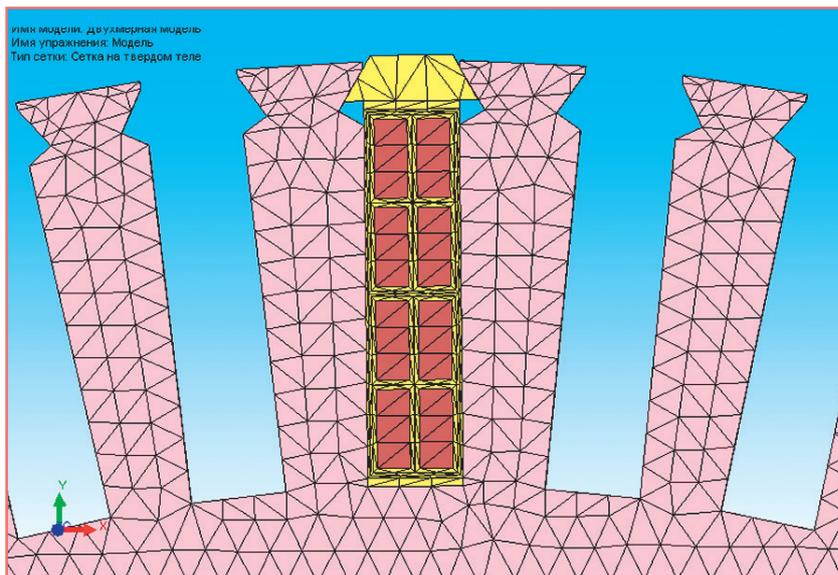


Рис. 2. Разбиение сеткой конечных элементов расчетного сектора якоря

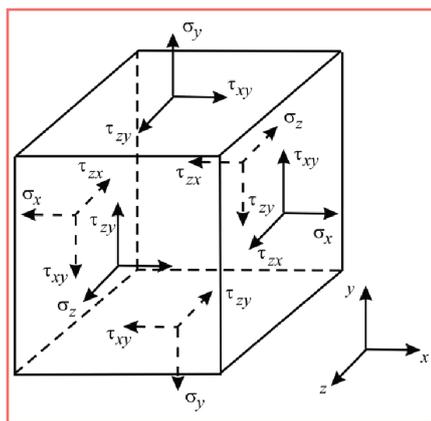


Рис. 3. Основные векторы напряжений в расчетном элементе изоляции

### Результаты расчета механических напряжений в изоляции

На рис. 4 показаны зависимости эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  в слое изоляции при изменении разности температур  $\Delta T$  для случая использования в качестве пропиточного материала лака Элимпрег-993ЭП (линия 1) и кремний-органического компаунда Элпласт-180 ИД (линия 2). Полученные значения эквивалентных напряжений  $\sigma_e$  в слое изоляции для рассматриваемых вариантов исполнения существенно различаются. Причина этого – несовпадение коэффициента теплового расширения разных материалов.

Термически индуцируемые напряжения в изоляции проводников якоря ТЭД в обоих случаях с увеличением  $\Delta T$  возрастают, но напряжения в изоляции, пропитанной лаком Элимпрег-993ЭП, значительно выше чем в изоляции, пропитанной кремний-органическим компаундом Элпласт-180 ИД. В первом случае максимальное напряжение достигает 104 МПа. Это значение довольно велико для пропиточного лака, особенно если принять во внимание, что эта величина находится около предела прочности затвердевшего лака Элимпрег-993ЭП. Несколько циклов такого высокого эквивалентного напряжения могут привести к повреждению изоляции, к разрушению пропиточного слоя и возникновению трещин, которые впоследствии могут быть заполнены атмосферной влагой, что приведет к повышению вероятности пробоя изоляции при работе ТЭД.

С другой стороны, коэффициент теплового расширения кремний-органического компаунда Элпласт-180 ИД примерно такой же, как у меди. Следовательно, изоляция будет испытывать такие же нагрузки, как и медные провода. Относительно меньшее эквивалентное напряжение является результатом пониженного коэффициента теплового расширения рассматриваемого пропиточного компаунда. Максимальное эквивалентное напряжение в изоляции в этом случае составляет около 67 МПа, что существенно ниже его предела прочности.

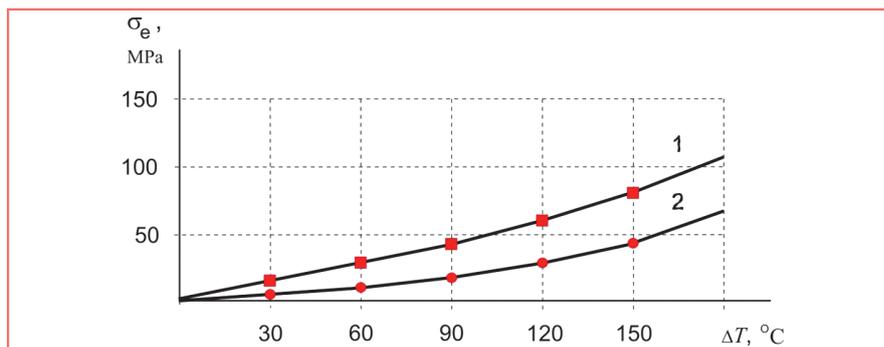


Рис. 4. Расчетные значения эквивалентного напряжения в слое изоляции, выполненной из стеклотенты с пропиткой лаком Элимпрег-993ЭП (1) и кремний-органическим компаундом Элпласт-180 ИД (2)

### Выводы

В статье исследованы две различные системы пропитки изоляции ТЭД тепловозов. Основное внимание уделяется механическому напряжению, создаваемому в обмотке при повышении температуры проводников. Моделирование показывает, что использование в технологии производства ТЭД тепловозов пропиточных компаундов вместо пропиточных лаков способно обеспечить существенное снижение механических напряжений в изоляции проводников и повышение надежности их работы в процессе напряженного режима эксплуатации.

### Литература

1. Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А., Хохлов А.Д. Влияние теплового состояния тягового асинхронного двигателя на характер его отказов и механических характеристик. Наука и техника транспорта. 2011. № 3. с. 56–61.
2. Грищенко А.В., Киселёв И.Г., Корнев А.С., Крылов Д.В. Повышение эффективности охлаждения силовых полупроводниковых приборов. Электротехника. 2016. № 5. с. 32–36.
3. Смирнов В.П. Износ изоляции тяговых электрических машин. / В.П. Смирнов, В.В. Лексаков, Д.В. Шарапов, Е.Г. Кармаданов // Наука и техника транспорта, 2012.– № 4. с. 62–64.
4. Филиппов, И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах /И. Ф. Филиппов.– Л.: Энергия, 1974.– 384 с.
5. Герасимов В.Г. «Электротехнический справочник. Общие вопросы. Электротехнические материалы». Том 1. 9-е издание, 2004.– с. 518.
6. Шрайбер М.А. Моделирование теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока. Бюллетень результатов научных исследований. 2014. № 4 (13). с. 36–38.
7. Межецкий Г.Д. Сопrotивление материалов: Учебник / Г.Д. Межецкий, Г.Г. Загребин, Н.Н. Решетник; под общ. Ред. Г.Д. Межецкого, Г.Г. Загребина.– 5-е изд.,– М. 2016.– 432с.
8. Kurowski, P. M. (2011). Teaching finite element analysis for design engineers. Proceedings of the Canadian Engineering Education Association. doi:10.24908/pceea.v0i0.3839.

### Курилкин Дмитрий Николаевич

Родился в 1978 году. В 2000 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 – 21 год. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС. Имеет 90 научных трудов.

### Шрайбер Марина Александровна

Родилась в 1984 году. В 2007 году окончила ПГУПС по специальности «Вагоны». Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитила диссертацию по теме «Повышение остаточного ресурса тяговых электродвигателей путем ограничения максимальной температуры обмоток». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС.

### Романова Анна Анатольевна

Родилась в 1976 году. В 2000 году окончила ПГУПС. Кандидат технических наук. Защитила диссертацию по теме «Совершенствование конструкции соединительных балок восьмиосных вагонов». Опыт работы – 19 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПС. Имеет 19 научных трудов.

### Kurilkin Dmitry

Was born in 1978. In 2000 he graduated from PGUPS with a degree in "Locomotives". Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor. In 2004 he defended his thesis on "Improving the traction and economic properties of locomotives with a polycardanic transmission". Work experience – 21 years. Currently works as the head of the department "Locomotives and locomotive economy" PGUPS. Has 90 scientific works.

### Schreiber Marina

Was born in 1984. In 2007 she graduated from PGUPS with a degree in "Wagons". Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor. In 2011 she defended her thesis on "Increasing the residual life of traction motors by limiting the maximum temperature of the windings." Work experience – 13 years. Currently works as an associate professor of the department "Locomotives and locomotive economy" PGUPS.

### Romanova Anna

Was born in 1976. Graduated from PGUPS in 2000. Candidate of Engineering Sciences. She defended her thesis on "Improving the design of connecting beams for eight-axle wagons". Work experience – 19 years. Currently works as an associate professor of the department "Wagons and wagons facilities" PGUPS. Has 19 scientific works.