

## Разработка алгоритма управления регуляторами мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава

А.Л. Мартусов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉aleksey.martusov@yandex.ru

### Резюме

В статье рассматривается вопрос энергетической эффективности регуляторов мощности, которые применяются на испытательных станциях тяговых электродвигателей подвижного состава. Проведенный анализ существующего оборудования показал, что в тиристорных преобразователях существуют коммутационные провалы в кривых синусоид питающего напряжения и несинусоидальность кривой тока. Наличие данных помех вызвано существующим интервалом коммутации, вследствие чего возникает междофазовое короткое замыкание коммутируемых фаз. Кроме того, существующие регуляторы мощности снижают действующее напряжение. Проведенный анализ работы предлагаемых регуляторов мощности в составе испытательной станции позволил составить эффективный алгоритм управления силовыми полупроводниковыми приборами, осуществляющими непосредственную передачу электрической энергии от промежуточного накопителя энергии на тяговые двигатели. Частота следования импульсов напряжения, которые прикладываются к обмоткам тяговых электродвигателей, выбрана таким образом, чтобы коэффициент пульсаций тока в обмотках тягового электродвигателя не превышал 2 % без использования сглаживающего реактора, что является отличительной особенностью применения управляемых выпрямителей, в которых для снижения коэффициента пульсаций используется сглаживающий реактор. Представленный математический анализ регуляторов мощности испытательной станции доказывает эффективность применения разработанного алгоритма управления силовыми полупроводниковыми приборами. Влияние на питающую сеть минимизировано за счет выбора соответствующей ширины импульсов управления силовыми полупроводниковыми приборами на каждом этапе работы тягового электродвигателя. Предлагаемый алгоритм управления позволяют не загружать питающую сеть дополнительными токами, обеспечивает высокую электромагнитную совместимость испытательной станции с питающей электрической сетью на всем диапазоне регулирования мощности.

### Ключевые слова

подвижной состав, испытательная станция, выпрямитель, тяговый двигатель, электромагнитная совместимость, коэффициент заполнения, математическая модель

### Для цитирования

Мартусов А.Л. Разработка алгоритма управления регуляторами мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава / А.Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 60–69. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).60-69.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 1.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 8.09.2022 г.; принята к публикации: 9.09.2022 г.

## Development of an algorithm for controlling the power regulators in the testing station of rolling stock traction electric motors

A.L. Martusov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉aleksey.martusov@yandex.ru

### Abstract

The article deals with the issue of energy efficiency of power regulators used at test stations for rolling stock traction electric motors. The analysis of the existing equipment showed that in thyristor converters switching gaps exist in the sinusoid curves of the supply voltage and non-sinusoidality in the current curve. The presence of these interferences is caused by the existing switching interval, resulting in an interphase short circuit of the switched phases. Besides, the existing power regulators reduce the operating voltage. The analysis of the operation of the proposed power controllers as part of the test station made it possible to develop an effective control algorithm for power semiconductor devices that directly transfer electrical energy from an intermediate energy storage device to traction motors. The repetition rate of voltage pulses applied to the windings of traction electric motors is chosen in such a way that the current ripple factor in the traction motors windings does not exceed 2 % without using a smoothing reactor, which is a distinctive feature of the use of controlled rectifiers, in which a smoothing reactor is used to reduce the ripple factor. The presented mathematical analysis of the power controllers of the test station proves the effectiveness of the developed algorithm for controlling power semiconductor devices. The impact on the supply network is minimized by choosing

the appropriate width of the power semiconductor devices control pulses at each stage of the traction electric motors operation. The proposed control algorithm makes it possible not to load the supply network with additional currents providing high electromagnetic compatibility of the test station with the supply network over the entire range of power regulation.

### Keywords

rolling stock, testing station, rectifier, traction motor, electromagnetic compatibility, duty cycle, mathematical model

### For citation

Martusov A.L. Razrabotka algoritma upravleniya regulyatorami moshchnosti ispytatel'noi stantsii tyagovykh elektrodvigateli podvizhnogo sostava [Development of an algorithm for controlling the power regulators in the testing station of rolling stock traction electric motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 60–69. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).60-69.

### Article Info

Received: September 1, 2022; Revised: September 8, 2022; Accepted: September 9, 2022.

### Введение

Актуальной задачей дальнейшего развития железной дороги является повышение энергоэффективности оборудования, применяемого для ремонта подвижного состава, в частности, для ремонта тяговых электродвигателей (ТЭД). Целесообразно уменьшать операционные расходы компании ОАО «РЖД» при выполнении ремонтов различных узлов ТЭД подвижного состава за счет повышения качества контроля и методов оценки состояния оборудования в процессе испытания ТЭД на станции.

Качество контроля и оценки состояния узлов ТЭД с возможностью экспериментального получения характеристик и параметров ТЭД в процессе испытаний можно обеспечить за счет совершенствования структуры и разработки нового оборудования электромеханической системы испытательной станции. Для выполнения регламента испытаний ТЭД и управления технологическими процессами с применением новой структуры и оборудования станции необходима разработка системы, алгоритма управления силовыми полупроводниковыми линейным, вольтодобавочным преобразователями и регулятором тока в обмотках возбуждения ТЭД.

### Методика исследования

Сегодня разработаны способы, методы и правила проведения ремонта и испытания ТЭД, составлены государственные стандарты и внедрены схемы для проведения их испытаний. Известные технические решения не позволяют определить отдельные параметры машин. В связи с применением тяги поездов повышенной массы и скорости и новых технологий их вождения, для обеспечения идентификации ТЭД при компоновке секций целесообразно на испы-

тательной станции получать механические и рабочие характеристики машин.

При анализе известных технических решений по разработке структурной схемы силового оборудования испытательной станции выявлена целесообразность независимого возбуждения генератора, последовательного и независимого возбуждения двигателя при совершенствовании станции для более качественной реализации регламента испытаний ТЭД и получения технических характеристик электрических машин, которые работают в режиме двигателя и режиме генератора. К недостаткам данного технического решения стоит отнести следующее:

- во время непроводящего состояния тиристорных выпрямителей и при коммутации тока в тиристорных плечах выпрямителя электрический потенциал питающей сети не используется для необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии;

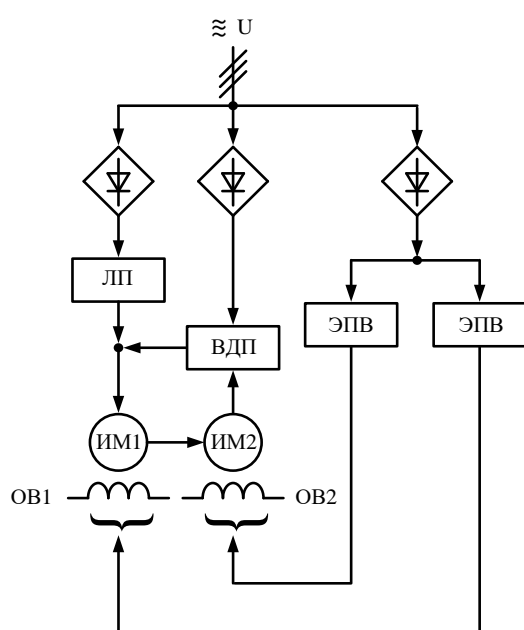
- в процессе коммутации тока тиристорами вторичные обмотки преобразовательных трансформаторов замкнуты накоротко, а электрическая энергия затрачивается на работу трансформатора в режиме короткого замыкания;

- неоправданные потери активной мощности и нелинейные искажения кривой переменного напряжения в питающей трехфазной электрической сети;

- сложность синхронизации импульсов управления тиристорами с нелинейными кривыми трехфазного переменного напряжения.

При разработке структурной схемы (рис. 1) силовых агрегатов электромеханической системы испытательной станции целесообразно предусмотреть возможность отдельного управления токами в обмотках якоря ма-

шин и в обмотках возбуждения для получения характеристик и параметров ТЭД в процессе выполнения испытаний.



**Рис. 1.** Функциональная схема силовых агрегатов электромеханической системы испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава:

ЛП – линейный преобразователь, ВДП – вольтодобавочный преобразователь, ЭПВ – электрический полупроводниковый вариатор, ИМ – испытуемая машина, ОВ – обмотка возбуждения

**Fig. 1.** Functional diagram of the testing station electromechanical system power units in the traction electric motors of the rolling stock:

ЛП - linear converter, ВДП - booster converter,  
ЭПВ – electric semiconductor variator,  
ИМ – machine tested, ОВ - excitation winding

Известные математические выражения [1–3] позволяют приближенно рассчитать коэффициент мощности выпрямителя с нагрузкой, количественно оценить нелинейные искажения тока и фазовый сдвиг первой гармоники тока относительно первой гармоники напряжения в сети при работе выпрямителя с импульсно-фазовым управлением.

В известных энергетических показателях выпрямительных установок не учитывается та часть полной мощности на входе регулятора, которая не используется для необратимого преобразования электрической энергии в ее иной вид и для энергообмена в цепи в момент непроводящего состояния силовых полупроводниковых приборов.

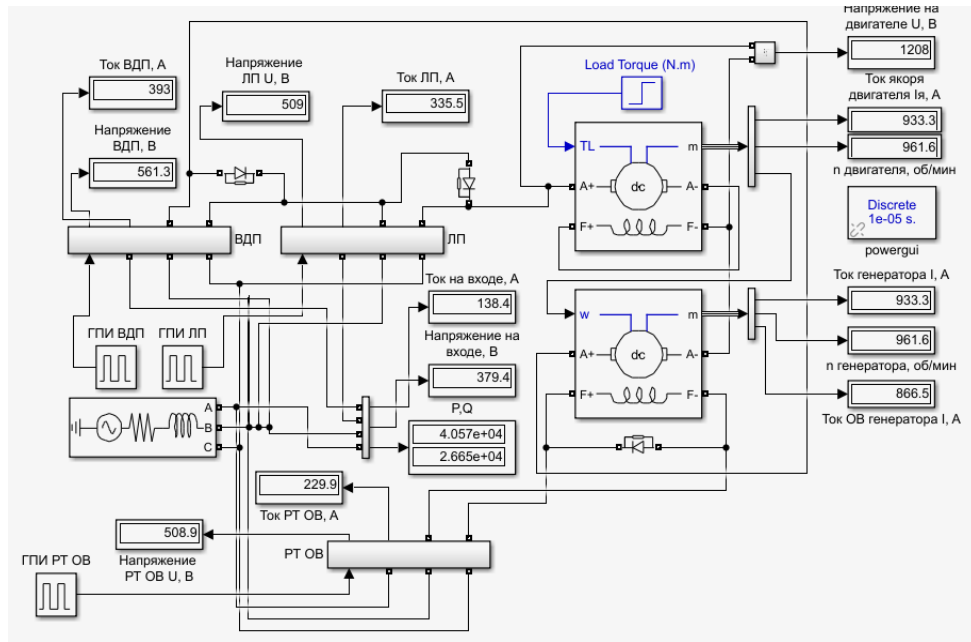
В процессе исследования целесообразно разработать новую конструкцию регуляторов мощности электромеханической системы испытательной станции, а также методику расчета характеристик ТЭД, энергетических характеристик элементов электромеханической системы испытательной станции и оценки электромагнитной совместимости испытательной станции с системой электроснабжения, исследовать и обосновать технические решения, позволяющие повысить использование электрического потенциала питающей сети и улучшить электромагнитную совместимость силового оборудования испытательной станции с системой электроснабжения.

На этапах пуска, трогания, разгона и регулирования мощности ТЭД на испытательной станции целесообразно использовать электрический потенциал на вводе испытательной станции вплоть до амплитуды кривой переменного напряжения, вместо снижения выпрямленного напряжения тиристорами известного управляемого выпрямителя.

На основании функциональной схемы (см. рис. 1) была построена математическая модель испытательной станции ТЭД с предлагаемыми регуляторами мощности в программе «Matrix laboratory» в среде Simulink. Далее представлена математическая модель испытательной станции ТЭД в номинальном режиме работы [4–9] (рис. 2).

При подаче тока на обмотку возбуждения генератора вступает в силу метод взаимной нагрузки, при котором скорость вращения двигателя-генератора достигает номинальной величины. Частота следования импульсов напряжения, которые прикладываются к обмоткам ТЭД выбрана таким образом, чтобы коэффициент пульсаций тока в обмотках ТЭД не превышал 2 % без использования сглаживающего реактора, что является отличительной особенностью применения управляемых выпрямителей, в которых для снижения коэффициента пульсаций используется сглаживающий реактор.

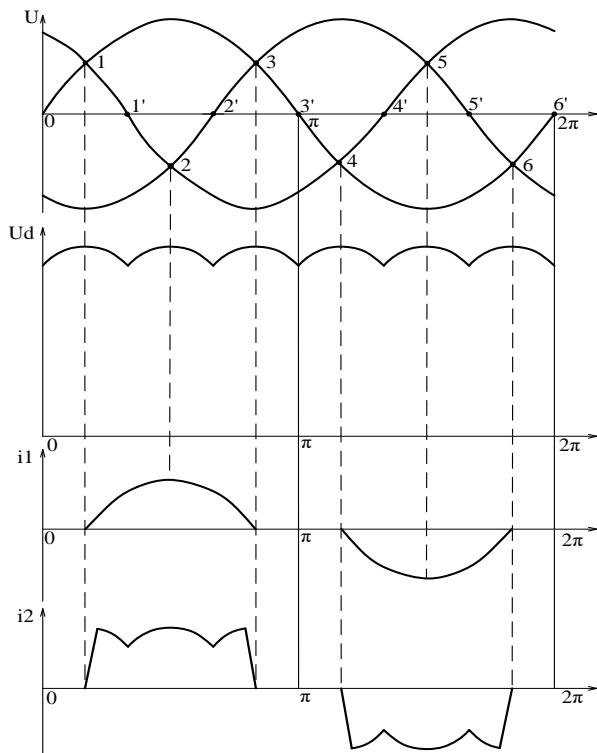
При отборе энергии от накопителя напряжение на выводах  $C$  снижается до номинального напряжения  $380 \cdot 1,35 = 513$  В. По временным осциллограммам напряжения и тока видно, что отпирание и запираение диодных плеч выпрямителя происходит по мере снижения напряжения на промежуточном накопителе и уменьшении напряжения входного сопротив-



**Рис. 2.** Математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей в номинальном режиме работы:  
 $K_z(\text{ЛП}) = 0,15; K_z(\text{ВДП}) = 0,0; I_{\text{ОВГ}} = 250 \text{ A}$

**Fig. 2.** Mathematical model of the test station of traction motors in nominal mode works

ления испытательной станции в точках 1 и 3, 4 и 6 (рис. 3).



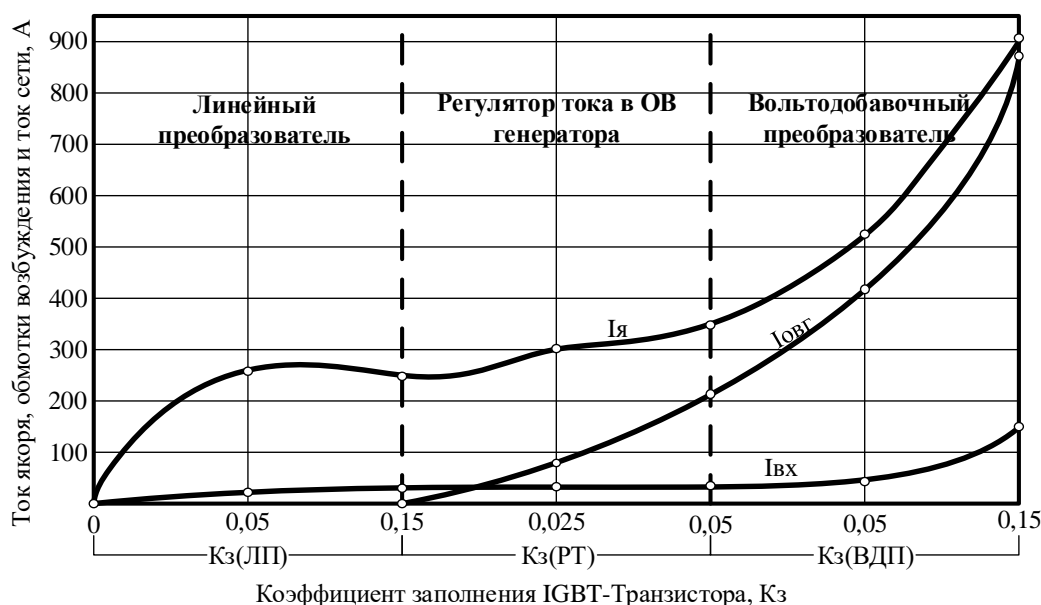
**Рис. 3.** Временные диаграммы выпрямленного напряжения и тока

**Fig. 3.** Rectified voltage and current timing diagrams

### Результаты исследования

Математическое моделирование электромеханической системы испытательной станции позволяет понять, насколько эффективно используется электрический потенциал питающего напряжения. Данный эффект достигается за счет составленного алгоритма испытаний, позволяющего минимизировать токи, потребляемые из сети (рис. 4).

Моделирование процесса работы испытательной станции начинается с зарядки всех промежуточных накопителей (ПН) регуляторов. При подаче напряжения на испытательную станцию ток заряда ПН поддерживается на заданном уровне ограничителем тока заряда (ОТЗ). В это время на IGBT-транзистор не подается импульс управления ( $K_z = 0$ ). Напряжение на выводах ПН увеличивается до амплитуды переменного трехфазного напряжения сети. Дiodы трехфазного мостового выпрямителя запираются, а входное электрическое сопротивление электромеханической системы испытательной станции становится бесконечно большим. После зарядки промежуточного накопителя подается импульс управления на IGBT-транзистор с помощью блока генератора прямоугольных импульсов линейного преобразователя (ГПИ ЛП) (см. рис. 2). Начинается отбор энергии от про-



**Рис. 4.** Алгоритм изменения тока якоря, обмотки возбуждения и тока на входе испытательной станции от коэффициента заполнения IGBT-транзистора  
**Fig. 4.** Algorithm for changing the armature current, field winding and current at the input of the test stations on the fill factor of the IGBT transistor

межуточного накопителя на цепь «двигатель – генератор». Исследованиями установлено, что при коэффициенте заполнения импульсов управления IGBT-транзистора линейного преобразователя  $K_z(\text{ЛП}) = 0,05$  величина пускового тока  $I_{я}$  не превышает 271 А, вал машин начинает плавно вращаться в основном за счет энергии, накопленной в ПН. Напряжение на выводах ПН снижается, поэтому угол проводимости диодов трехфазного выпрямителя плавно увеличивается от 0 до 120 электрических градусов. Входное электрическое сопротивление электромеханической системы уменьшается. В момент пуска двигателей из трехфазной сети потребляется незначительный линейный ток, который не превышает 10 А.

В интервале работы испытательной станции при  $0 < K_z(\text{ЛП}) < 0,15$  участвуют ЛП, двигатель и генератор. Ток в обмотке возбуждения генератора равен 0. Для эффективности пуска двигателей ток в обмотке возбуждения генератора отсутствует для того, чтобы не загружать питающую сеть большими токами. При увеличении  $K_z(\text{ЛП})$  происходит разгон двигателя и генератора.

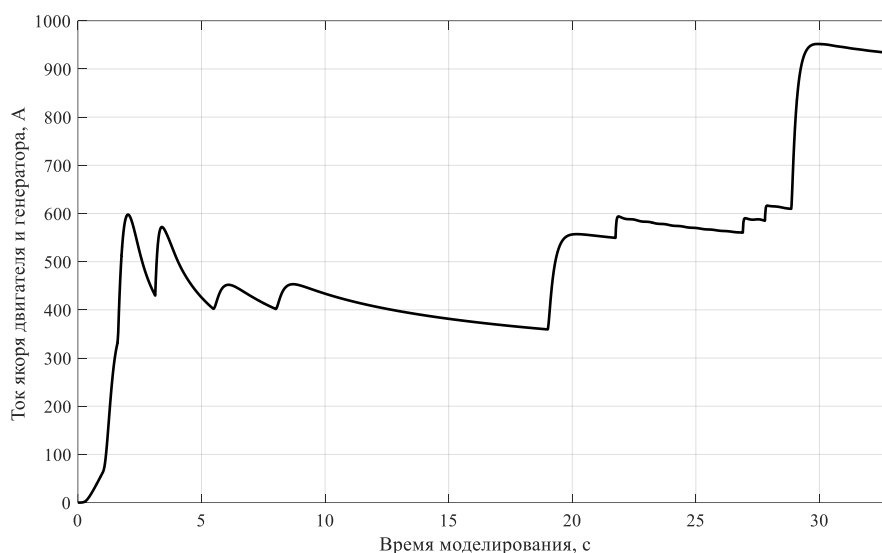
В интервале работы испытательной станции при  $0 < I_{овг} < 229$  А происходит плавное изменение тока в обмотке возбуждения генератора с помощью блока генератора прямоуголь-

ных импульсов регулятора тока (ГПИ РТ) обмотки возбуждения, скорость вращения двигателей достигает половины от номинальной скорости вращения ( $n \sim 400$  об/мин). Далее представлены математические модели испытательной станции с изменением тока в обмотке возбуждения генератора в диапазоне от 0 до 230 А. Посредством математического моделирования появляется возможность оценить эффективность работы регуляторов мощности испытательной станции тяговых электродвигателей. Следующим этапом является включение в работу испытательной станции включается ВДП, с помощью блока ГПИ ВДП. Математическая модель испытательной станции моделирует процесс испытания двигателя и генератора, при котором ток в обмотке возбуждения генератора равен 870 А. При этом ток якоря имеет значение 933,3 А, а скорость вращения вала якоря двигателя и генератора 961,6 об/мин. Для дальнейшего исследования регуляторов мощности испытательной станции представлены графические зависимости основных показателей. На рис. 5 показана зависимость тока, протекающего в цепи якоря и обмотки возбуждения двигателя, а также в цепи якоря генератора, от времени моделирования. На графике видно, как повышение коэффициента заполнения IGBT-транзистора линейного преобразователя влияет на изменение тока в

якорной цепи двигателя и генератора. В период времени от 2,5 с. до 10 с. происходит увеличение коэффициента заполнения IGBT-транзистора линейного преобразователя с помощью системы управления в диапазоне от 0 до 15 %, ток в цепи якоря изменяется в диапазоне от 400 А до 600 А.

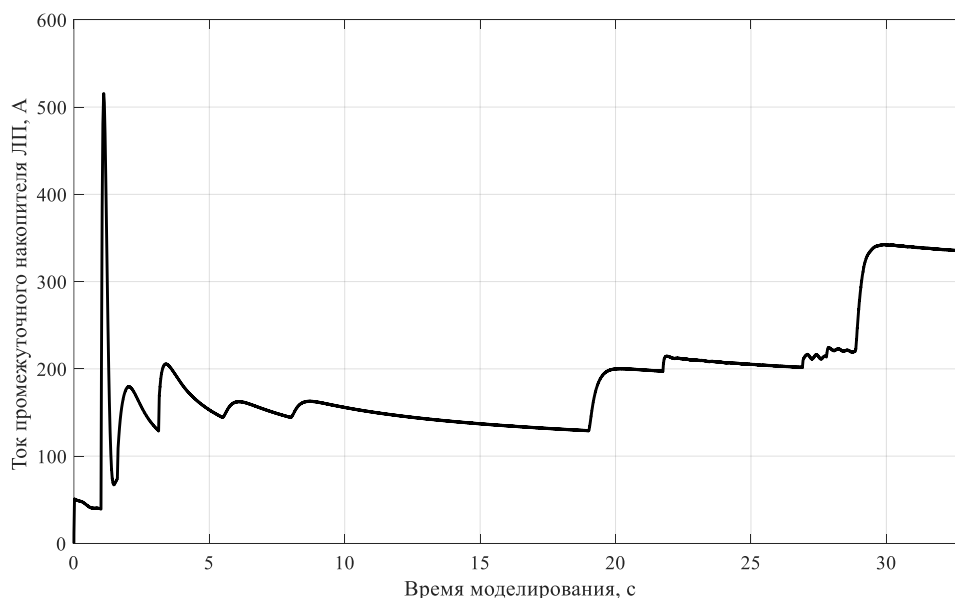
На рис. 6 и 7 показаны графические зави-

симости токов промежуточных накопителей линейного и вольтодобавочного преобразователей. На рис. 6 изменяется ток, поступающий с линейного преобразователя в якорную цепь двигателя и генератора на всем диапазоне моделирования. Ток с промежуточного накопителя линейного преобразователя не превышает 335,5 А в номинальном режиме работы.



**Рис. 5.** График зависимости тока якоря двигателя и генератора от времени моделирования

**Fig. 5.** Plot of motor anchor and generator current versus simulation time



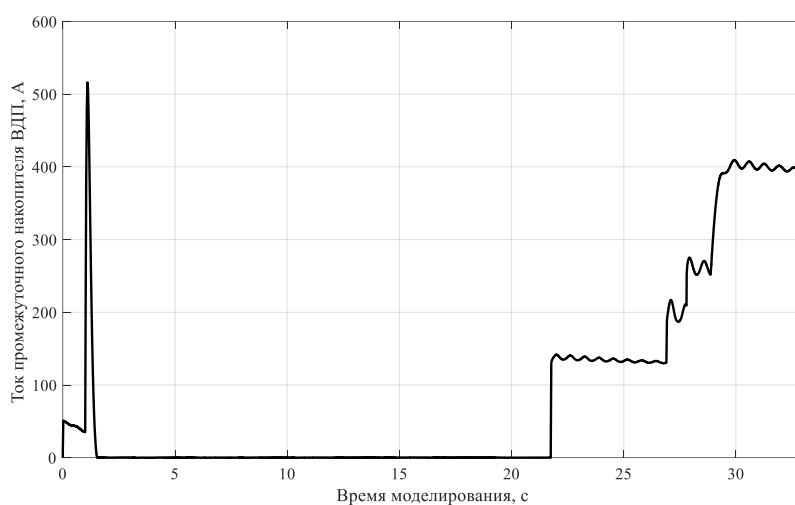
**Рис. 6.** График зависимости тока промежуточного накопителя линейного преобразователя от времени моделирования

**Fig. 6.** Graph of the dependence of the intermediate storage of the linear converter current on time modeling

На рис. 7 можно увидеть изменение тока промежуточного накопителя вольтодобавочного преобразователя от времени моделирования. Вольтодобавочный преобразователь вступает в работу только в конце моделирования, для вывода электрических машин на номинальный режим.

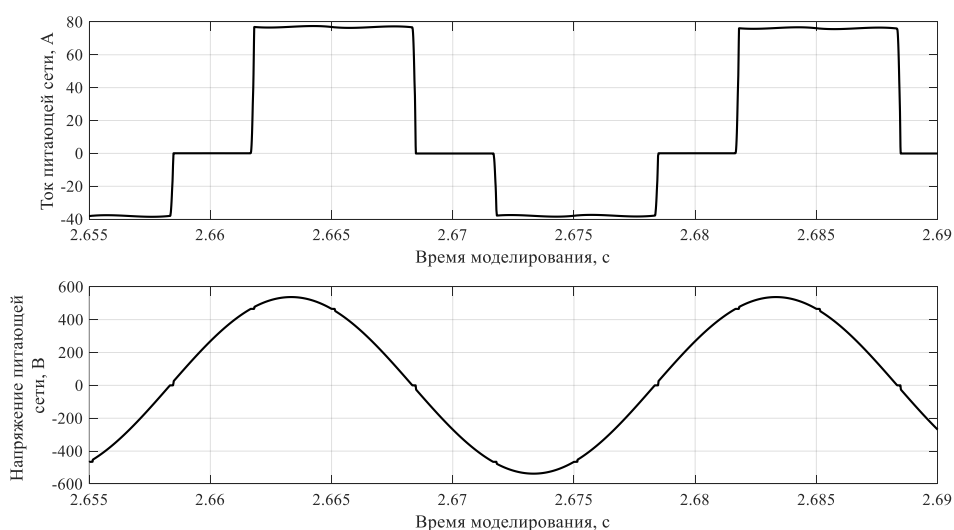
По осциллограммам видно оказываемое влияние предлагаемых регуляторов мощности на питающую сеть. Кривая тока не отстает от кривой напряжения, а также отсутствует негативное влияние на кривую напряжения, которым отличается регулятор мощности на тиристорах. Для плавного и независимого регулирования тока в обмотках возбуждения ТЭД разработан

алгоритм управления IGBT-транзисторами VT3, VT4. Работа каналов широтно-импульсного регулирования (ШИР) напряжения организована последовательно, и ограничена полупериодом для каждого канала. Диапазон регулирования ширины импульсов напряжения управления равен от 0 до 50 % от максимума. После запуска микроконтроллер осуществляет процедуру инициализации, выполняющую настройку режимов работы микроконтроллера и периферийных устройств, в частности таймера TMR0, ведущего отсчет периода формирования первого импульса ШИР, а также объявление констант и переменных. На рис. 8 представлены осциллограммы тока и напряжения питающей



**Рис. 7.** График зависимости тока промежуточного накопителя вольтодобавочного преобразователя от времени моделирования

**Fig. 7.** Graph of the dependence of the intermediate storage of the booster converter current on time modeling



**Рис. 8.** Осциллограммы напряжения и тока питающей сети

**Fig. 8.** Mains voltage and current oscillograms

сети, от которой работает испытательная станция на предлагаемых регуляторах мощности.

После завершения инициализации выполняет циклическое выполнение программы формирования ШИР. Цикл программы формирования ШИР состоит из выполнения подпрограмм:

1. Ожидание прерывания по переполнению таймера TMR0 (период формирования одного импульса ШИР).

2. Обработки прерывания таймера TMR0, перезапуска таймера TMR0, вывода на порт PORTC данных текущего состояния каналов ШИР.

3. Считывание данных аналого-цифрового преобразователя и обновления параметров регулирования. Если параметры регулирования изменены, то обнуляются счетчики периода и ширины импульсов.

В программе MatLab блоком управления модели является «Pulse Generator» [10–14], который генерирует прямоугольные импульсы с регулярными интервалами для управления IGBT-транзистором с применением драйвера. Параметры формы сигнала блока, амплитуда, ширина импульса, период и задержка фазы, определяют форму выходного сигнала. В модели испытательной станции данный блок

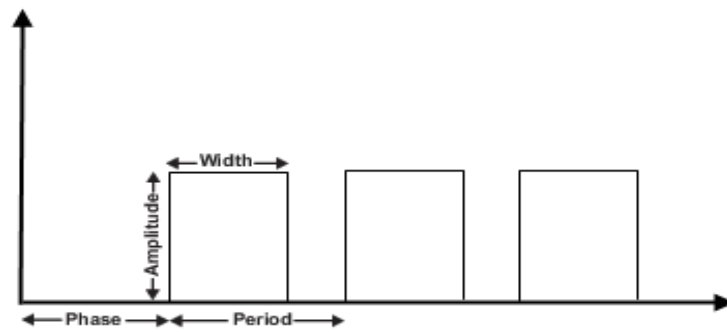


Рис. 9. Временная диаграмма импульсов управления  
Fig. 9. Timing diagram of control pulses

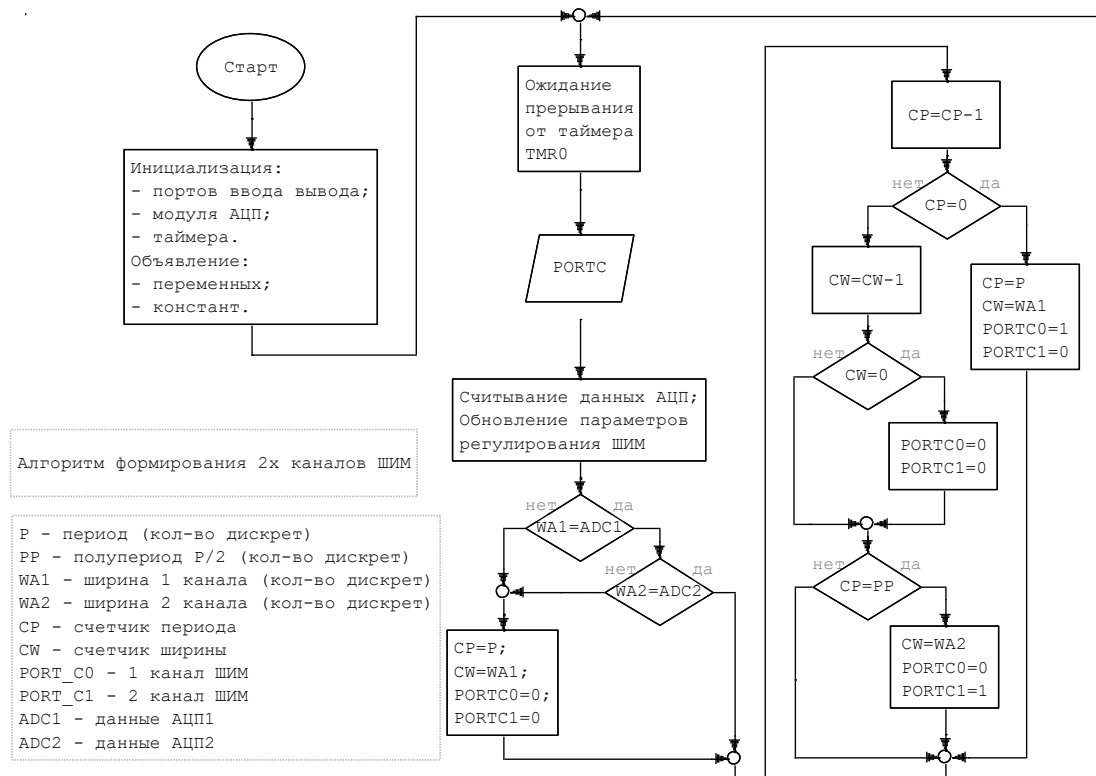


Рис. 10. Алгоритм управления IGBT-транзисторами  
Fig. 10. IGBT-transistors control algorithm



представляет систему управления IGBT-транзистора. На рис. 9 представлена диаграмма, показывающая, как каждый параметр импульсов влияет на форму сигнала. Блок Pulse Generator может генерировать скалярные, векторные или матричные сигналы любого реального типа данных.

Чтобы сгенерировать скалярный сигнал, используются скаляры для указания параметров формы волны. Чтобы произвести векторный или матричный сигнал, используются, соответственно, векторы или матрицы для определения параметров формы сигнала. Каждый элемент параметров формы импульсов влияет на соответствующий элемент выходного сигнала. Например, первый элемент векторного параметра амплитуды определяет амплитуду первого элемента векторного выходного импульса. Все параметры формы сигнала должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения (рис. 10).

Тип данных вывода аналогичен данным параметра Amplitude [15–18]. Выходные данные блока сгенерированы в режиме на основе времени или выборки, что определяется параметром типа Pulse. В режиме, основанном на времени, Simulink вычисляет выход блока только в те моменты, когда выход фактически изменяется. Этот подход приводит к меньшему количеству вычислений для вывода блока за период времени моделирования.

### Заключение

Получено новое научно обоснованное техническое решение, направленное на совершенствование технологии ремонта ТЭД подвижного состава. Разработанный алгоритм управления испытательной станцией ТЭД подвижного состава, позволяет эффективно использовать электрический потенциал питающей сети, а также способен минимизировать потребляемые токи во время пуска и разгона ТЭД.

### Список литературы

1. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
2. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. Новосибирск: НГУ, 1990. 219 с.
3. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
4. Теоретические основы электротехники / Под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976. Т. 1. 544 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высшая школа, 1996. 638 с.
6. Бадер М.П. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока и обеспечение электромагнитной совместимости // Электроснабжение и водоподготовка. 2000. № 2. С. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. Improvement in Power Factor & THD Using Dual Boost Converter // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2012. Vol. 2 (4). P. 2368–2376.
8. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-BackControlled Bridgeless PFC Boost Converter // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 29–38.
9. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWMControlled Active Power Filters // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 225–236.
10. Teigelkötter J., Sprenger D. Мощные преобразователи на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе. Мюнхен: Siemens AG, 2000.
11. Умов Н.А. Избранные сочинения. М. ; Л. : Гостехиздат, 1950. 571 с.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field / Philosophical Transactions of the Royal Society. London: 175, 1884. P. 343–361.
13. Уточненный закон сохранения энергии / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, К.П. Якобчук и др. : Rusnauka : сайт. URL: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm) (Дата обращения: 15.08.2022).
14. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л. Энергосберегающее использование электрической энергии // Universum: Технические науки. 2016. № 11(32). С. 25–30.
15. Alekseeva T., Ryabchyonok N., Astrakhantsev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. P. 120–133.
16. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава / А.В. Воротилкин, Н.Л. Михальчук, Н.Л. Рябченко и др. // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 6. С. 62–76.
17. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
18. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.

### References

1. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
2. Zinov'ev G.S. Pryanые metody rascheta energeticheskikh pokazatelei ventil'nykh preobrazovatelei [Direct methods for calculating the energy performance of valve converters]. Novosibirsk: NGU Publ., 1990. 219 p.

3. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
4. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1976, vol. 1, 544 p.
5. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p.
6. Bader M.P. Povyshenie effektivnosti tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka i obespechenie elektromagnitnoi sovместимости [Increasing the efficiency of direct current traction power supply and ensuring electromagnetic compatibility]. *Elektrosnabzhenie i vodopodgotovka* [Power supply and water treatment], 2000, no. 2, pp. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. Improvement in Power Factor & THD Using Dual Boost Converter. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2012, vol. 2 (4), pp. 2368–2376.
8. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-Back Controlled Bridgeless PFC Boost Converter. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 29–38.
9. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWM Controlled Active Power Filters. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 225–236.
10. Teigelkötter J., Sprenger D. Powerful IGBT converters for railway rolling stock applications. Munich: Siemens AG, 2000.
11. Umov N.A. Izbrannye sochineniya [Selected Works]. Moscow; Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1950. 571 p.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. London: 175, 1884, pp. 343–361.
13. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. Utochneniy zakon sokhraneniya energii (Elektronnyy resurs) [Refined law of conservation of energy (Electronic resource)]. Available at: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm) (Accessed August 15, 2022).
14. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L. Energoberegayushchee ispol'zovanie elektricheskoi energii [Energy-saving use of electrical energy]. *Universum: Tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical sciences], 2016, no. 11(32), pp. 25–30.
15. Alekseeva T., Ryabchenok N., Astrakhantsev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT*, 2017, pp. 120–133.
16. Vorotilkin A.V., Mihal'chuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnye perspektivy tyagovogo elektropodvizhnogo sostava [Innovative perspectives of traction electric rolling stock]. *Mir transporta* [World of transport], 2015, vol. 13, no. 6, pp. 62–76.
17. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow; UMTS ZHDT Publ., 2015. Vol. 2. 307 p.
18. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.

#### Информация об авторах

**Мартусов Алексей Леонидович**, ассистент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [aleksey.martusov@yandex.ru](mailto:aleksey.martusov@yandex.ru).

#### Information about the authors

**Aleksei L. Martusov**, assistant lecturer of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [aleksey.martusov@yandex.ru](mailto:aleksey.martusov@yandex.ru).