

На правах рукописи



УСТИНОВ Роман Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ**

Специальность 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) на кафедре «Электроподвижной состав».

Научный
руководитель:

МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроподвижной
состав» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный
университет путей сообщения».

Официальные
оппоненты:

ЧЕРЕМИСИН Василий Титович
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Подвижной состав электрических
железных дорог» ФГБОУ ВО «Омский государ-
ственный университет путей сообщения».

СКОРИК Виталий Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электротехника, электроника и электромеха-
ника» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государ-
ственный университет путей сообщения».

Ведущая
организация:

Федеральное государственное автономное об-
разовательное учреждение высшего образова-
ния «Российский университет транспорта»
(РУТ (МИИТ)), г. Москва.

Защита состоится «28» апреля 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.003.07 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС) по адресу: Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47, главный корпус, ауд. 204.

С диссертацией, авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДВГУПС» (www.dvgups.ru) и на официальном сайте (vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47, ФГБОУ ВО «ДВГУПС», ученому секретарю диссертационного совета Д 218.003.07, e-mail: kabalyk@festu.khv.ru

Автореферат разослан «__» февраля 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
Д 218.003.07, к.т.н., доцент



Ю.С. Кабалык

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Рекуперативное торможение является одним из основных энергосберегающих ресурсов на электроподвижном составе железных дорог, кроме того, оно обеспечивает предельную скорость движения поездов по участку, значительно снижает продольно-динамические усилия в поезде, уменьшает износ колесных пар и тормозных колодок, повышает безопасность движения поездов.

Для сохранения преимуществ, которые дает рекуперативное торможение на электроподвижном составе переменного тока, необходима бесперебойная работа выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП). Анализ характера и причин отказов электрического оборудования электровозов показал, что основная часть выходов из строя силовой части ВИП происходит из-за неисправности электронных компонентов и сбоев в работе системы управления преобразователями. Большая часть таких отказов приводит к пропуску импульсов управления и выводу из строя тиристорных плеч ВИП, что вызывает срыв режима рекуперативного торможения электровоза. Потеря тормозного эффекта электровоза и переход на пневматическое торможение приводят к образованию продольно-динамических усилий в составе, которые способны привести к сходу подвижного состава с рельсовой колеи. Неисправное электрическое торможение у электровоза в эксплуатации является не допустимым как в пассажирском, так и в грузовом движениях.

Степень разработанности проблемы. Вопросы повышения работоспособности и надёжности работы ВИП в режиме рекуперативного торможения являются проработанными многими учеными, такими как: Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман, В. А. Кучумов, В. Б. Похель, Ю. М. Иньков, Н. А. Ротанов, В. П. Феоктистов, А. Н. Савоськин, С. В. Власьевский, Ю. М. Кулинич, А. Л. Лозановский, Л. Д. Капустин, Н. С. Назаров, В. В. Литовченко, Л. В. Поссе, В. А. Голованов, К. Г. Кучма, С. Н. Засорин, А. Т. Бурков, Б. М. Наумов, Н. С. Копанев, Н. Н. Широченко, В. Т. Черемисин, А. А. Бакланов, О. В. Мельниченко и др. Однако значительная часть разработок в вышеуказанных направлениях основана на установке дополнительных элементов и оборудования в конструкцию электровоза или преобразователя, что влечет за собой удорожание и усложнение систем управления тяговым приводом. Благодаря применению на современных отечественных электровозах микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД) многие задачи, связанные с повышением работоспособности, могут решаться при помощи доработки программного обеспечения, отвечающего за управление тяговыми преобразователями электровоза.

Целью диссертационной работы является повышение работоспособности ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения при пропусках импульсов управления на их тиристорные плечи.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

- провести анализ силовых схем электровозов переменного тока и технических решений, направленных на защиту тяговых преобразователей электровозов от аварийных режимов работы;
- провести аналитическое исследование электромагнитных процессов ВИП электровоза как при штатной работе, так и при аварийной, вызванной пропусками импульсов управления;
- разработать способ повышения работоспособности ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения при пропусках импульсов управления на их тиристорные плечи;
- разработать способ определения тиристорных плеч ВИП электровоза переменного тока, не принявших токовую нагрузку;

- уточнить математическую модель электровоза в режиме рекуперативного торможения с предлагаемым способом повышения работоспособности ВИП при пропусках импульсов управления;

- провести сравнительное исследование результатов математического моделирования работы электровоза в режиме рекуперативного торможения с типовым и предлагаемым алгоритмами управления ВИП при пропусках импульсов управления.

Объектом исследования является ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения.

Предметом исследования являются электромагнитные процессы ВИП в режиме инвертора при аварийной работе, вызванной пропусками импульсов управления на его тиристорные плечи.

Методы исследования. Исследование основано на применении теории электрических цепей, методов математического моделирования, численных методов решения интегральных и дифференциальных уравнений, теории преобразовательных устройств. Экспериментальные исследования проводились на математической модели в интерактивной среде MatLab/Simulink.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан способ повышения работоспособности ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения, основанный на резервировании тиристорных плеч, не принявших токовую нагрузку другими – параллельными плечами этого же преобразователя, обеспечивающий сохранение процесса инвертирования тока и тормозную силу электровоза.

2. Разработан способ определения тиристорных плеч ВИП, не принявших токовую нагрузку, основанный на анализе длительности коммутации тока в контурах преобразователя и скорости его нарастания.

3. Уточнена математическая модель системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в режиме рекуперативного торможения, позволяющая исследовать электромагнитные процессы штатной и аварийной работы ВИП электровоза, вызванной пропусками импульсов управления, а также с предлагаемым способом управления преобразователями.

Практическая ценность и реализация результатов работы состоит в следующем:

1. Обобщенная математическая модель системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз», разработанная в программном комплексе «MatLab», позволяет исследовать электромагнитные процессы, протекающие в ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения при: аварийной работе ВИП, срабатывании типовой системы защиты и предлагаемом способе управления с сохранением процесса инвертирования.

2. Методика определения начала возникновения аварийного нарастания тока в силовых цепях ВИП электровоза и выявления тиристорных плеч преобразователей, не принявших токовую нагрузку.

3. Алгоритм управления тиристорными плечами ВИП электровоза в случае пропусков импульсов управления для микропроцессорных систем управления тяговым приводом электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения.

4. Программное обеспечение для микропроцессорных систем управления тяговым приводом электровозов переменного тока с тиристорными ВИП в режиме рекуперативного торможения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Электромагнитные процессы при аварийной работе ВИП в режиме инвертора, вызванной пропусками импульсов управления.

2. Способ повышения работоспособности ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения, обеспечивающий защиту силовых цепей преобразователя от токов короткого замыкания с сохранением процесса инвертирования и торможения.

3. Электромагнитные процессы ВИП электровоза переменного тока при управлении согласно разработанному алгоритму, исключающему образование аварийных токов в его силовых цепях.

4. Обобщенная математическая модель системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» для режима рекуперативного торможения с предлагаемым алгоритмом управления ВИП электровоза, реализованная в интерактивной среде MatLab/Simulink.

5. Результаты математического моделирования электромагнитных процессов ВИП в режиме рекуперативного торможения электровоза переменного тока при аварийной работе, вызванной пропусками импульсов управления и работе согласно разработанному алгоритму управления.

Достоверность научных положений и результатов диссертации подтверждается итогами математического моделирования в интерактивной среде MatLab/Simulink и совпадением их с результатами эксплуатационных испытаний электровоза серии 2ЭС5К.

Апробация работы. Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура сибирского региона» (ИрГУПС, Иркутск, 2016, 2018 гг.); всероссийской научно-практической конференции «Наука и молодёжь» (ИрГУПС, Иркутск, 2016-2018 гг.); всероссийской научно-практической конференции «Экспертиза разработанных технических моделей для повышения качества образовательного процесса по специальности 23.05.03» (Иркутск, 2017 г.), всероссийской научно-практической конференции «Безопасность транспорта и сложных технических систем глазами молодежи» (ИрГУПС, Иркутск, 2018 г.), международной конференции «Научные исследования 2018» Карловы Вары (Чехия), расширенном межкафедральном научно-техническом семинаре ФГБОУ ВО «Дальневосточного государственного университета путей сообщения» (ДВГУПС, Хабаровск, 2018, 2019 гг.), научно-техническом совете ФГБОУ ВО «Иркутского государственного университета путей сообщения» (ИрГУПС, Иркутск, 2019 г.), заседании научно-технического семинара ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета» (КнАГУ, Комсомольск-на-Амуре, 2019 г.), международная научная конференция «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (ДВГУПС, Хабаровск, 2019 г.)

Публикации. Основные научные результаты диссертации изложены в 14 научных статьях, из них две в журналах из перечня рецензируемых изданий ВАК при Минобрнауке России, одна в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus, получен один патент на изобретение и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и четырех приложений. Объем диссертации составляет 162 страницы основного текста, 6 таблиц, 88 рисунков, список использованных источников включает 122 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана краткая характеристика работы.

В первой главе работы представлена тенденция развития статических преобразователей, применяемых на отечественных электровозах переменного тока и способы защиты тиристорных преобразователей от аварийных режимов работы.

На основании проведенного анализа работ в области рекуперативного торможения и способов защиты инверторов электровоза переменного тока определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты исследования электромагнитных процессов ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения методом анализа мгновенных схем замещения при штатной и аварийной работах, вызванных пропусками импульсов управления на тиристорные плечи преобразователя.

Анализ причин, приводящих к образованию аварийных процессов и к неисправному состоянию ВИП показал, что основная часть отказов и повреждений силовой части преобразователя происходит из-за выхода из строя электронных элементов и сбоев в работе системы управления преобразователями. Значительная часть таких отказов приходится на пропуск импульсов управления, подаваемых на управляющие электроды тириستоров плеч ВИП.

Пропуск импульсов управления может произойти по ряду причин: обрыв проводов управления, замыкание проводов управления на корпус электровоза или между собой, ослабление контактов клеммной рейки силового блока, некачественная пайка штепсельных соединений разъемов и др. Вследствие чего образуется аварийный режим работы ВИП, при котором сила тока в цепи преобразователя многократно превышает допустимые значения.

Для определения моментов пропусков импульсов управления предлагается решение, основанное на анализе сигналов датчиков угла коммутации (ДУК). На рис. 1 представлены токи (*a*) и длительности коммутаций (*б*) тиристорных плеч на примере работы ВИП электровоза на IV зоне регулирования.

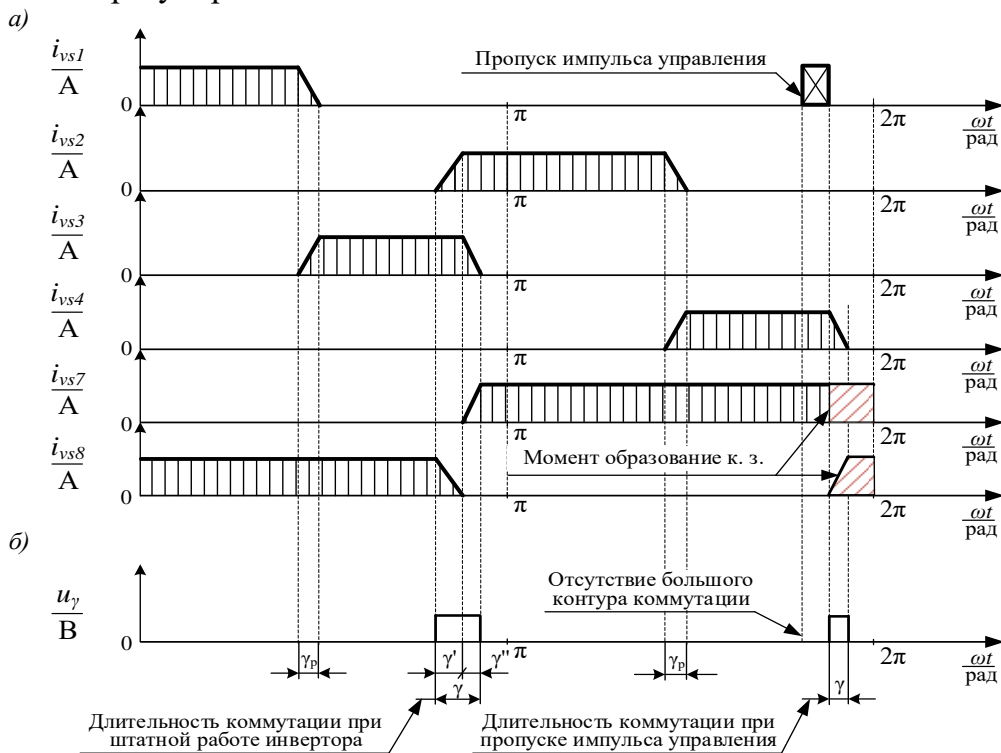


Рис. 1. Диаграмма токов плеч ВИП (*a*) и напряжения ДУК (*б*)

Во время коммутации плеч ВИП происходит изменение величины тока в первичной обмотке ДУК, при этом на его вторичной обмотке возникает электрический сигнал прямо пропорциональный длительности этой коммутации u_{γ} . В случае пропуска импульса управления образуется только один контур коммутации как показано на рис.1, который по длительности значительно меньше, чем сигнал при штатной работе.

В третьей главе приведены результаты исследования электромагнитных процессов ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения методом анализа мгновенных схем замещения при пропусках импульсов управления с предлагаемым алгоритмом работы ВИП.

Благодаря применению на электровозах современных серий «Ермак» и ЭП1М/П микропроцессорной системы управления многие задачи по повышению работоспособности работы электровоза в режиме рекуперативного торможения могут решаться с помощью доработки программного обеспечения без установки дополнительного оборудования в кузов электровоза.

Предлагаемый способ повышения работоспособности ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения заключается в резервировании тиристорных плеч, не принявших токовую нагрузку другими – параллельными плечами этого же преобразователя без применения дополнительного оборудования.

Для реализации предлагаемого способа повышения работоспособности ВИП разработан алгоритм управления тиристорными плечами для высших зон регулирования напряжения, представленный в табл. 1.

Табл. 1. Алгоритм управления тиристорными плечами ВИП электровоза переменного тока в случае пропусков импульсов управления при рекуперативном торможении

Зона регулирования	Аварийное плечо	Направление э.д.с инвертора	Алгоритм работы плеч ВИП							
			VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
IV	VS1	→	-	-	β	-	-	-	-	β
		←	-	β	-	-	-	-	β	-
	VS2	→	β	-	-	-	-	-	-	β
		←	-	-	-	β	-	-	β	-
	VS7	→	β	-	-	-	-	-	-	β
		←	-	β	-	-	β	-	-	-
	VS8	→	β	-	-	-	-	β	-	-
		←	-	β	-	-	-	-	β	-
III	VS3	→	-	-	-	-	β	-	-	β
		←	-	-	-	β	-	-	β	-
	VS4	→	-	-	β	-	-	-	-	β
		←	-	-	-	-	-	β	β	-
	VS7	→	-	-	β	-	-	-	-	β
		←	-	β	-	-	β	-	-	-
	VS8	→	β	-	-	-	-	β	-	-
		←	-	β	-	-	-	-	β	-
II	VS1	→	-	-	-	-	β	-	-	β
		←	-	-	-	-	-	β	β	-
	VS2	→	-	-	-	-	β	-	-	β
		←	-	-	-	-	-	β	β	-
	VS5	→	β	-	-	-	-	β	-	-
		←	-	-	-	β	-	-	β	-
	VS6	→	-	-	β	-	-	-	-	β
		←	-	β	-	-	β	-	-	-

На рис. 2 представлены диаграммы тока и напряжения контактной сети, выпрямленного напряжения и тока ВИП, токов плеч ВИП и сигналов датчиков угла коммутации на примере работы ВИП согласно разработанному алгоритму управления на примере IV зоны регулирования при пропуске импульса управления тиристорного плеча VS2. На интервале 4-π-5 показано аварийное нарастание токов генераторов электровоза из-за образования короткого замыкания. С момента времени, соответствующему точке 5, работа ВИП осуществляется согласно предлагаемому алгоритму управления (табл. 1).

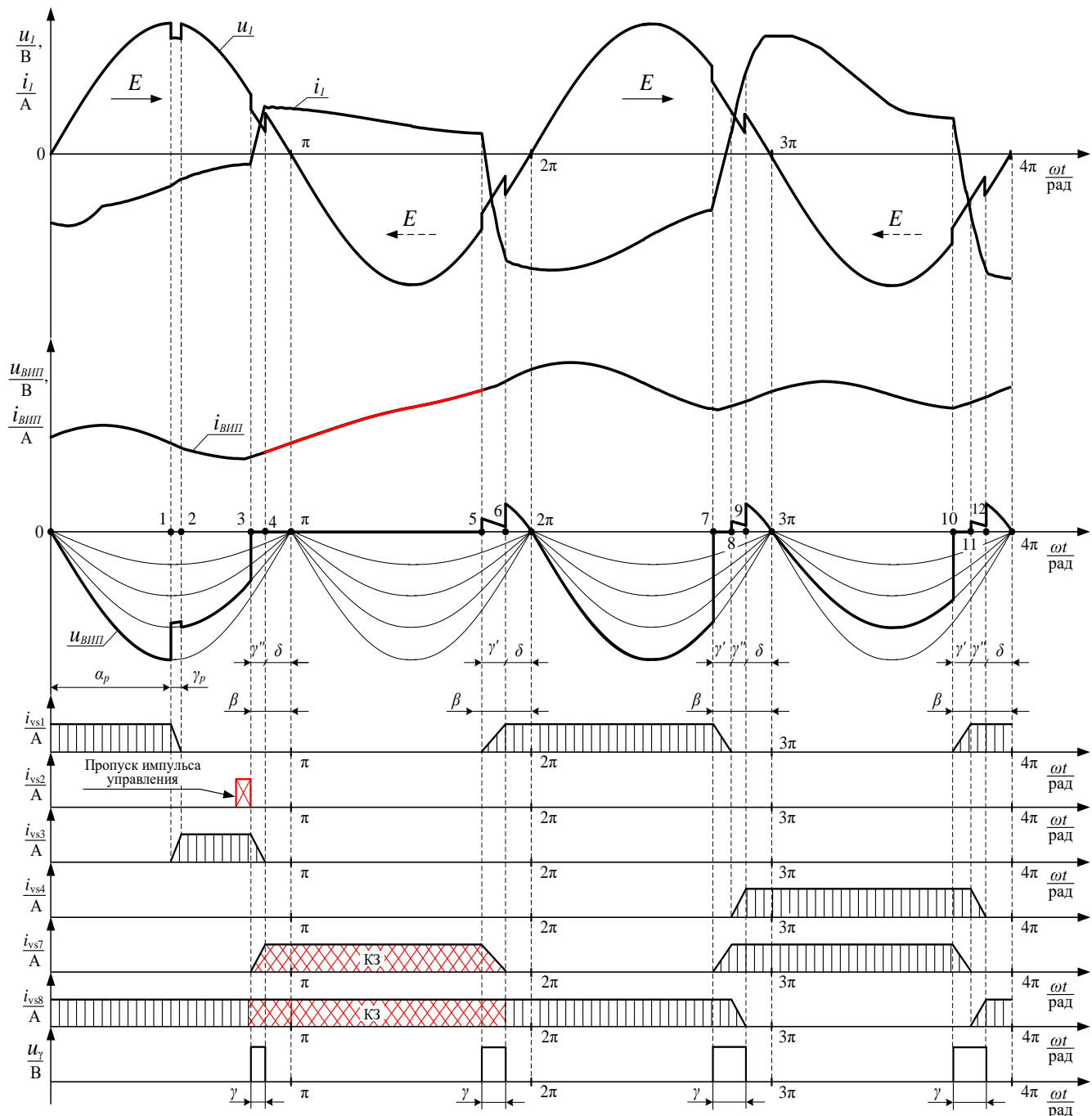
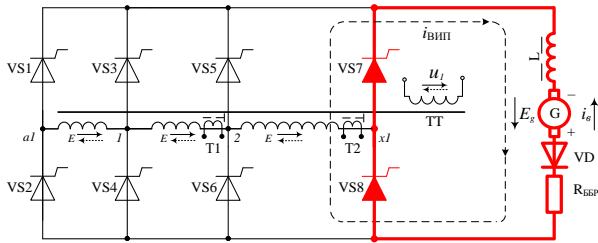


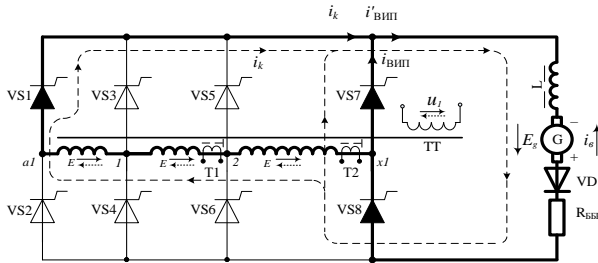
Рис. 2. Диаграммы токов и напряжений, характеризующие процесс инвертирования электровоза при работе согласно разработанному алгоритму

На рис. 3 приведены мгновенные схемы замещения для временных интервалов: 4-π-5, 5-6, 6-2π-7, 7-8, 8-9, 9-3π-10, обозначенные на кривой напряжения ВИП, рис. 2. Далее для каждого интервала представлены соответствующие им системы уравнений. В уравнениях приняты следующие обозначения: Δu_{vsn} – падение напряжения на тиристоре плеча ВИП (n-номер плеча), $i_{ВИП}$ – ток ВИП, i'_k – большой контур протекания тока при коммутации тиристорных плеч ВИП, i''_k – малый контур протекания тока при коммутации тиристорных плеч ВИП, $L_{ВИП\delta}$ – эквивалентная индуктивность цепи постоянного тока, L_{k-m} – индуктивность вторичной обмотки тягового трансформатора (k и m выводы тяговых секций вторичной обмотки), E_{k-m} – ЭДС вторичной обмотки тягового трансформатора, E_g – ЭДС генератора, $\Delta u_{ВИП}$ – падение напряжения в цепи постоянного тока.



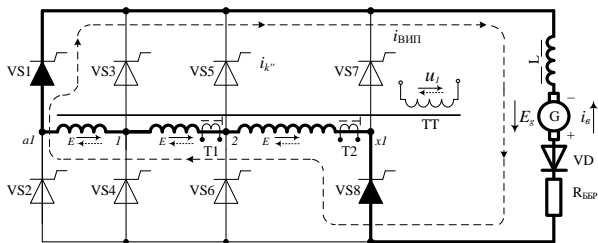
Интервал 4-π-5

$$\frac{di_{ВВП}}{dt} = \frac{E_g - \Delta u_{ВВП} - \Delta u_{VS8} - \Delta u_{VS7}}{L_{ВВПЭ}};$$



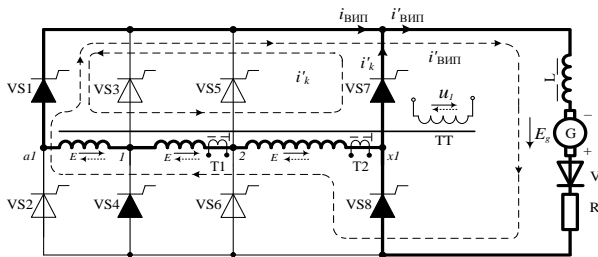
Интервал 5-6

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{ВВП}}{dt} &= \frac{E_g - \Delta u_{ВВП} - \Delta u_{VS8} - \Delta u_{VS7}}{L_{gЭ}}; \\ \frac{di_k}{dt} &= \frac{E_{a1-x1} + \Delta u_{VS1} - \Delta u_{VS7}}{L_{a1-x1} + L_{ВВПЭ}}; \\ i_{ВВП} + i_k - i'_{ВВП} &= 0. \end{aligned} \right.$$



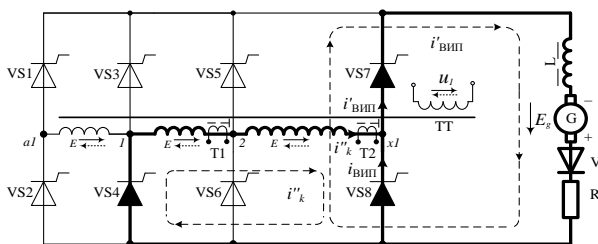
Интервал 6-2π-7

$$\frac{di_{ВВП}}{dt} = \frac{E_g - E_{a1-x1} - \Delta u_{ВВП} - \Delta u_{VS8} - \Delta u_{VS1}}{L_{a1-x1} + L_{ВВПЭ}};$$



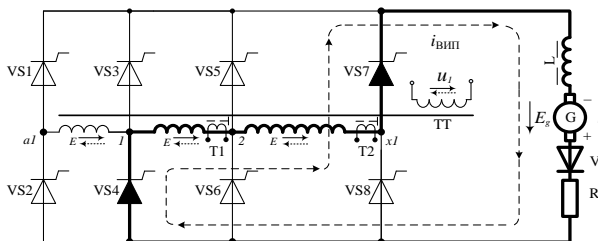
Интервал 7-8

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{ВВП}}{dt} &= \frac{E_g - E_{a1-x1} - \Delta u_{ВВП} - \Delta u_{VS8} - \Delta u_{VS1}}{L_{a1-x1} + L_{ВВПЭ}}; \\ \frac{di'_k}{dt} &= \frac{E_{a1-x1} + \Delta u_{VS7} - \Delta u_{VS1}}{L_{a1-x1} + L_{ВВПЭ}}; \\ i_{ВВП} + i'_k - i'_{ВВП} &= 0. \end{aligned} \right.$$



Интервал 8-9

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{ВВП}}{dt} &= \frac{E_g - E_{1-x1} - \Delta u_{ВВП} - \Delta u_{VS8} - \Delta u_{VS1}}{L_{1-x1} + L_{ВВПЭ}}; \\ \frac{di''_k}{dt} &= \frac{E_{1-x1} + \Delta u_{VS4} - \Delta u_{VS8}}{L_{1-x1} + L_{ВВПЭ}}; \\ i_{ВВП} + i''_k - i'_{ВВП} &= 0. \end{aligned} \right.$$



Интервал 9-3π-10

$$\frac{di_{ВВП}}{dt} = \frac{E_g - E_{1-x1} - \Delta u_{ВВП} - \Delta u_{VS4} - \Delta u_{VS7}}{L_{1-x1} + L_{ВВПЭ}}.$$

Рис. 3. Мгновенные схемы замещения ВИП электровоза при работе согласно разработанному алгоритму управления на примере IV зоны регулирования

Четвертая глава посвящена математическому моделированию электромагнитных процессов при штатной и аварийной работах ВИП электровоза переменного тока, а также при работе с использованием предлагаемого способа повышения работоспособности ВИП и защиты преобразователя от аварийных токов короткого замыкания, возникающих из-за пропусков импульсов управления. При разработке математической модели учитывался опыт исследований таких ведущих российских ученых как: д-р. техн. наук, профессор А. Н. Савоськин, д-р. техн. наук, профессор С. В. Власьевский, д-р. техн. наук, профессор Ю. М. Кулинич. Блок-схема имитационной модели на примере силовых цепей одной тележки электровоза 2ЭС5К включает в себя: ВИП в режиме рекуперативного торможения с двумя параллельно подключенными к нему тяговыми электродвигателями (ТЭД), работающими в генераторном режиме, тяговый трансформатор (ТТ), блок управления ВИП и блок пропуска/замены сигналов управления, представлена на рис. 4.

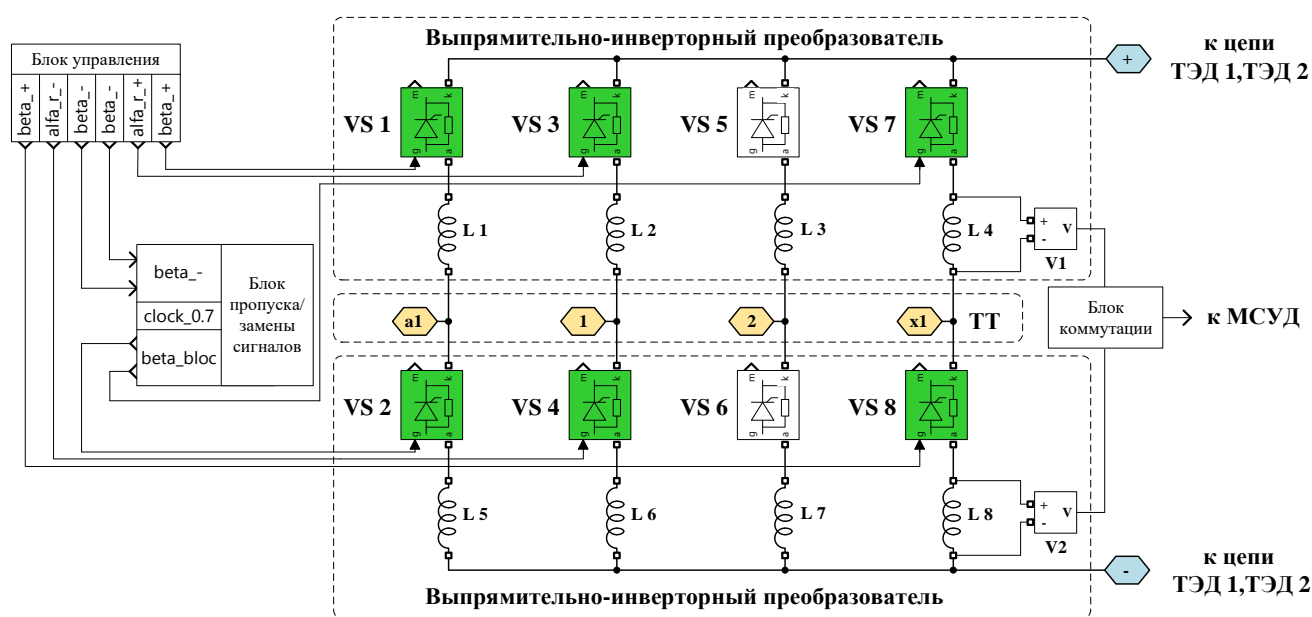


Рис. 4. Блок-схема ВИП электровоза в редакторе Simulink

Для предлагаемого способа повышения работоспособности ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения от токов короткого замыкания, вызванных пропусками импульсов управления, разработан алгоритм работы блока управления ВИП, представленный на рис. 5. Предлагаемый алгоритм включает в себя следующие блоки: 1 – Блок, осуществляющий подачу импульсов управления на тиристорные плечи преобразователя VS1...VS8; 2 – Блок, осуществляющий контроль за длительностью коммутации через датчики угла коммутации, штатно установленные на электровозе; 3 – Блок проверки условия по длительности коммутации; 4 – Блок, осуществляющий контроль за скоростью нарастания тока в цепи преобразователя через датчики тока, штатно установленные на электровозе; 5 – Блок проверки условия по скорости нарастания тока; 6, 6' – Блоки определения отсутствия коммутации в большом γ' либо в малом γ'' контурах коммутации; 7 – Блок определения тиристорного плеча ВИП, не принявшего нагрузку (аварийного); 8 – Блок резервирования (замены) аварийного плеча другим тиристорным плечом этого же преобразователя.

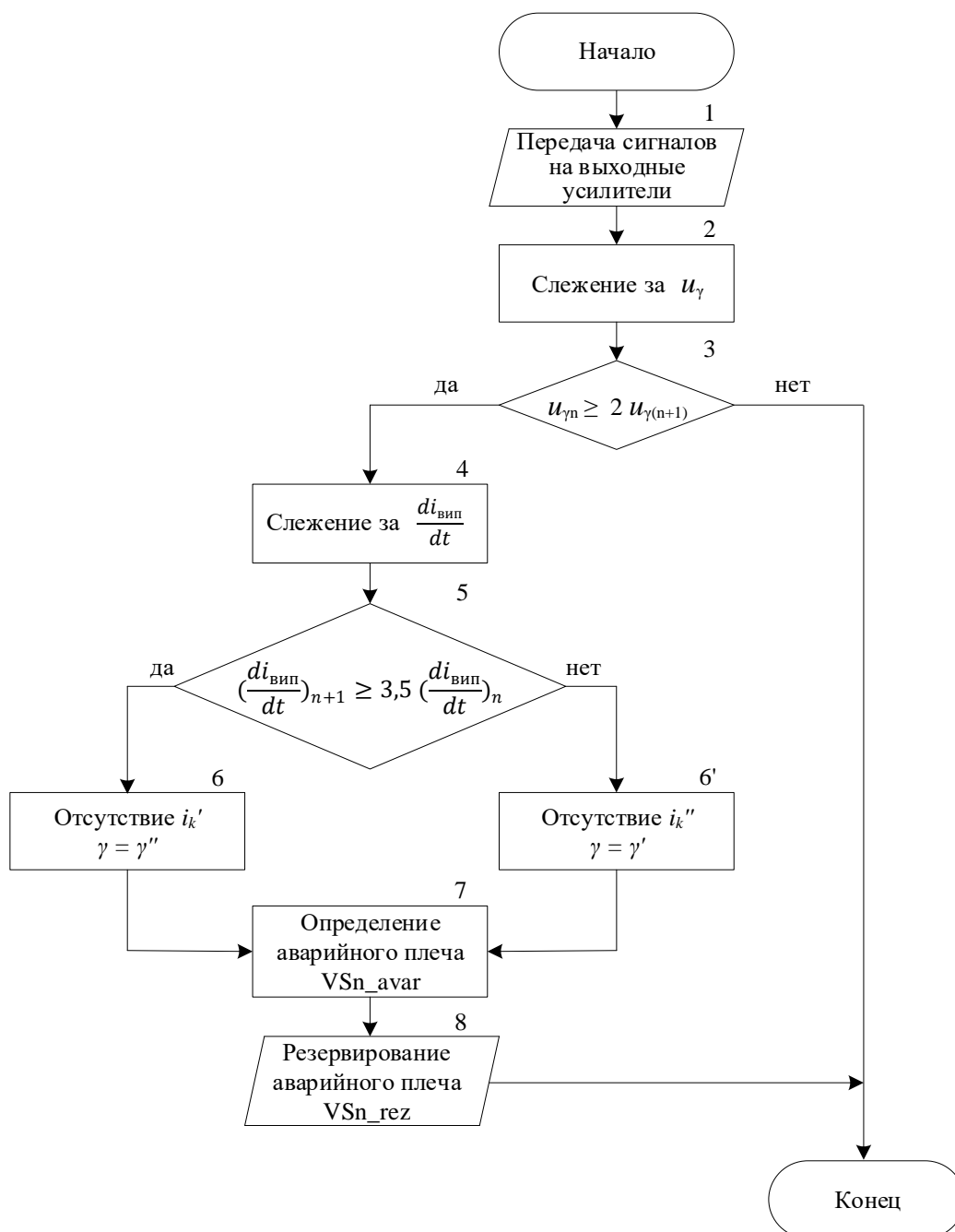


Рис. 5. Блок-схема разработанного алгоритма работы блока управления ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения при пропусках импульсов управления

При работе ВИП согласно разработанному алгоритму, представленному на рис. 5, исключается аварийное нарастание тока в силовых цепях электровоза, происходит сохранение режима рекуперативного торможения.

В пятой главе представлен анализ результатов математического моделирования электромагнитных процессов ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при работе штатного и предлагаемого алгоритмов управления ВИП на примере IV зоны регулирования, в случае пропусков импульсов управления на тиристорные плечи VS2 и VS7. На рис. 6-9 представлены электромагнитные процессы ВИП в режиме рекуперативного торможения на IV зоне регулирования при пропуске импульсов управления на плечо VS2.

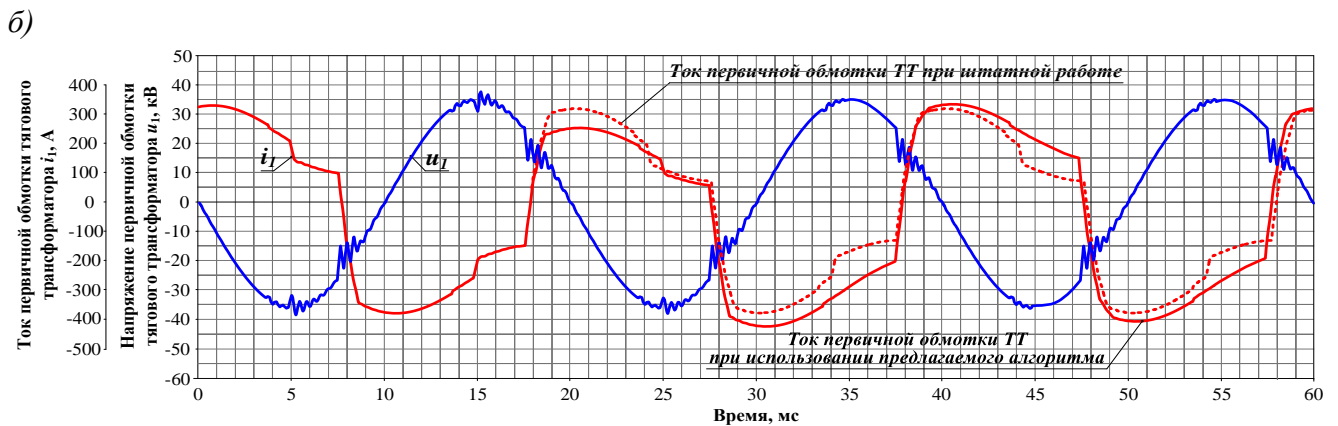
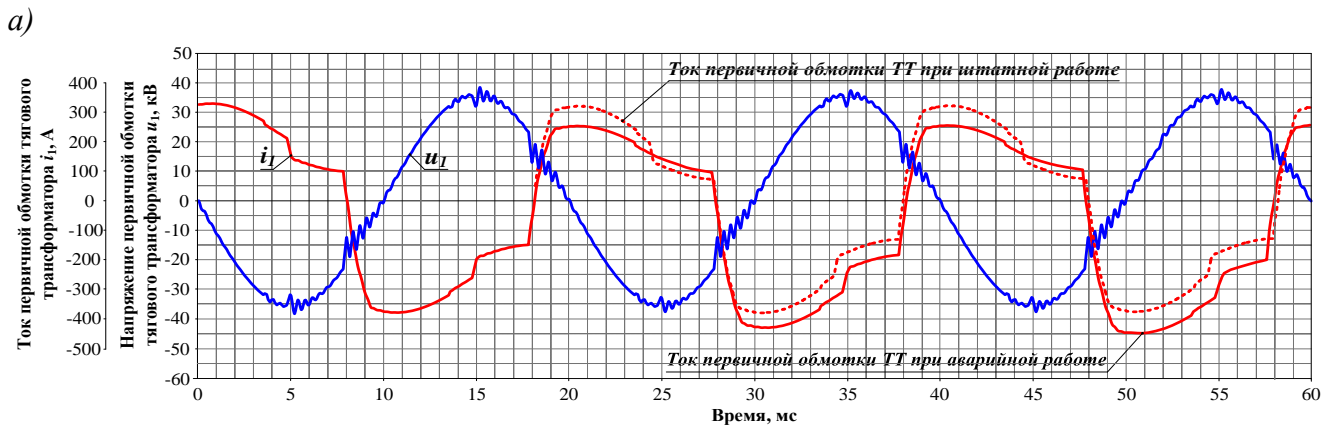


Рис. 6. Форма кривых напряжения u_1 и тока i_1 в первичной обмотке ТТ электровоза при аварийной работе ВИП на примере IV зоны регулирования при одинаковой нагрузке и параметрах работы электровоза: а) типовому алгоритму управления; б) предлагаемому алгоритму управления

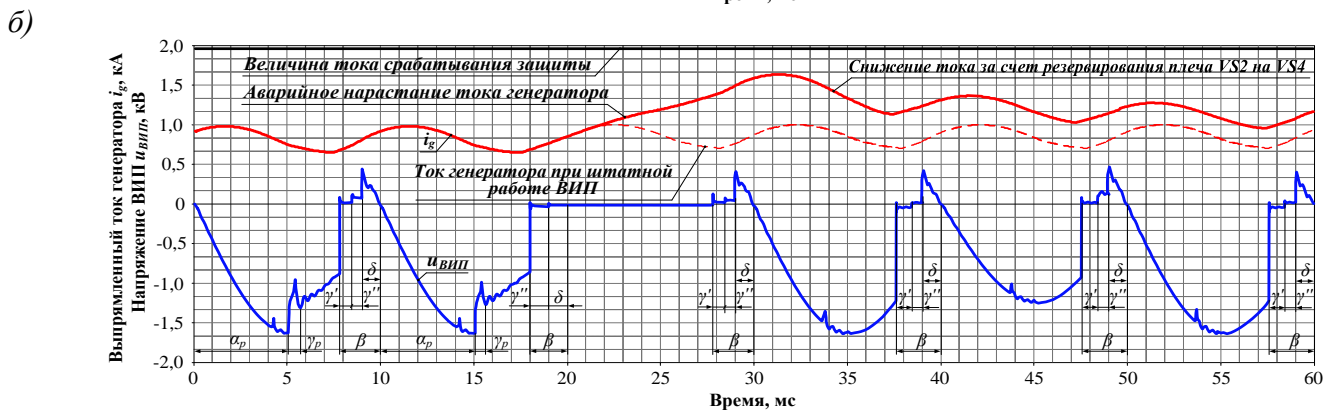
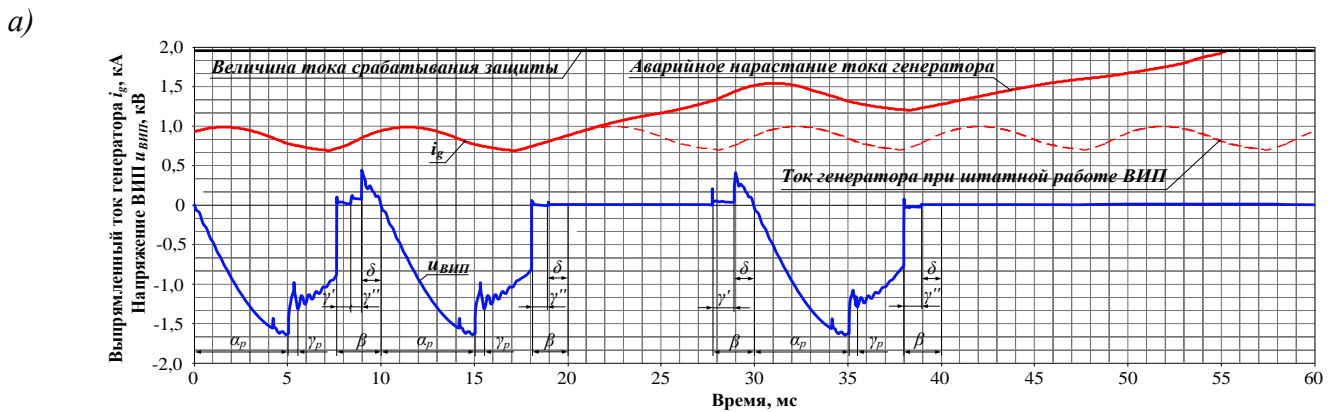


Рис. 7. Диаграммы электромагнитных процессов при аварийной работе ВИП на примере IV зоны регулирования при одинаковой нагрузке и параметрах работы электровоза: а) типовой алгоритм управления; б) предлагаемый алгоритм управления

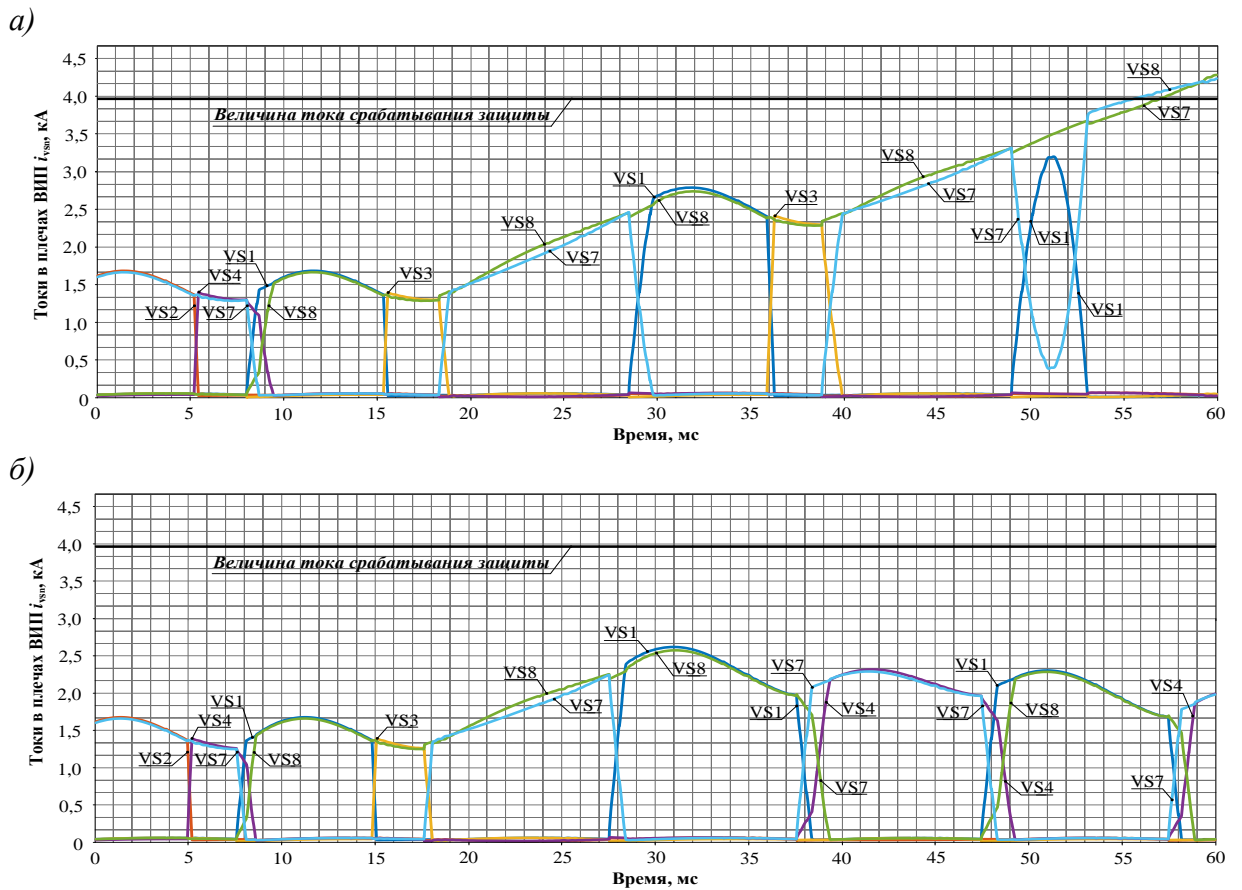


Рис. 8. Диаграммы токов плеч ВИП при аварийной работе на примере IV зоны регулирования при одинаковой нагрузке и параметрах работы электровоза:
 а) типовой алгоритм управления; б) предлагаемый алгоритм управления

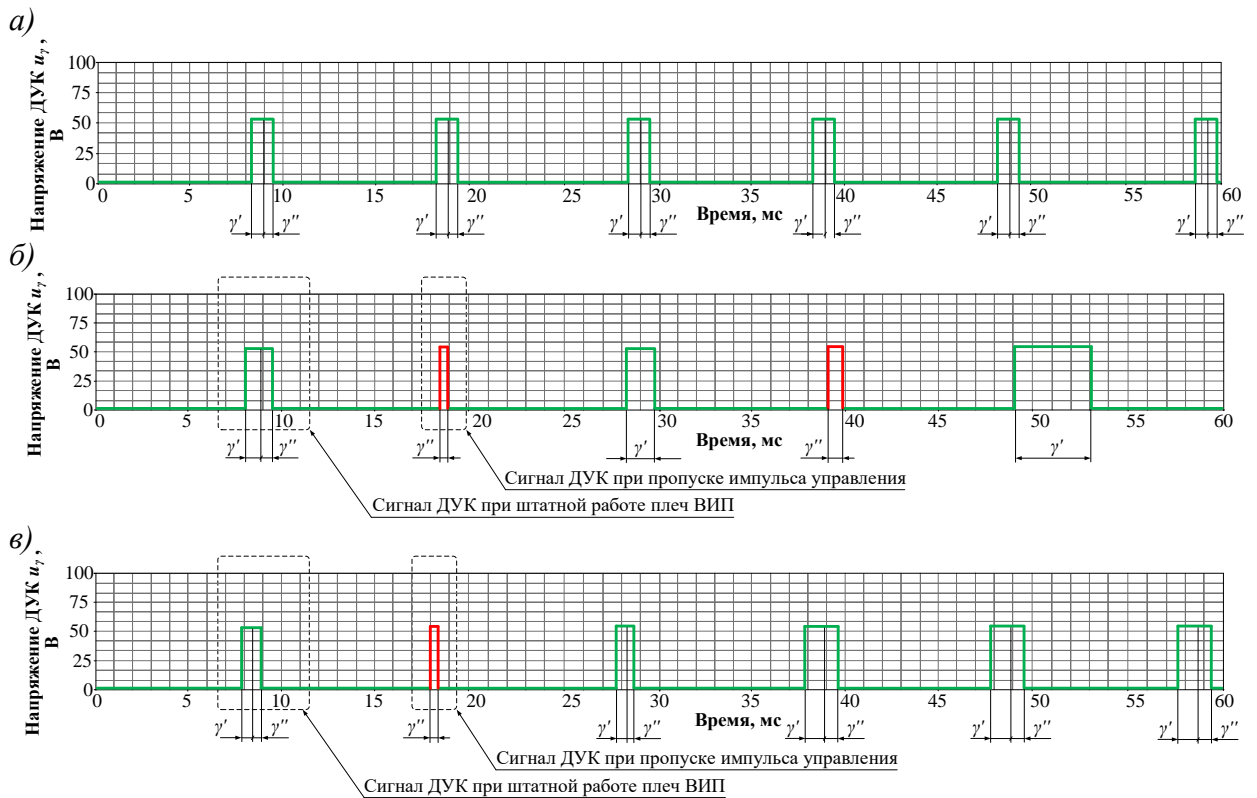


Рис. 9. Кривые напряжения ДУК u_γ при работе ВИП на примере IV зоны регулирования при одинаковой нагрузке и параметрах работы электровоза: а) штатная работа б) типовой алгоритм управления при пропуске импульса управления на плечо VS2; в) предлагаемый алгоритм управления при пропуске импульса управления

Из приведенных на рис. 6-9 результатов видно, что при работе ВИП согласно предлагаемому алгоритму управления исключаются аварийные токи режима короткого замыкания в силовых цепях электровоза. Это достигается, например, на IV зоне регулирования за счет резервирования тиристорного плеча VS2 параллельным плечом VS4, в соответствии с разработанным алгоритмом управления тиристорными плечами ВИП в режиме инвертора, представленного в табл. 1. Результатом предлагаемого технического решения является повышение работоспособности режима рекуперативного торможения, что в свою очередь приводит к повышению безопасности движения грузовых и пассажирских поездов, а также к повышению энергоэффективности современных отечественных электровозов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ силовых схем электровозов переменного тока и технических решений защиты тяговых преобразователей электровозов от аварийных режимов работы при рекуперативном торможении, который показал, что все решения при пропусках импульсов управления не обеспечивают работоспособность преобразователей, а направлены только на срабатывание защиты их силовых цепей.

2. Разработаны мгновенные схемы замещения ВИП при штатной и аварийной работах, связанные с пропусками импульсов управления, получены системы дифференциальных уравнений, описывающие коммутационные и внекоммутационные интервалы изменения тока.

3. По результатам анализа мгновенных схем замещения ВИП электровоза переменного тока выявлено, что пропуски импульсов управления на плечи преобразователя приводят к образованию тока короткого замыкания и, как следствие, к неизбежному срыву режима рекуперативного торможения.

4. Разработан способ повышения работоспособности ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, основанный на резервировании тиристорных плеч, не принявших токовую нагрузку другими – параллельными плечами этого же преобразователя, позволяющий сохранить процесс инвертирования тока и тормозную силу электровоза.

5. Разработан способ определения тиристорных плеч ВИП, не принявших токовую нагрузку, основанный на анализе длительности коммутации тока в контурах преобразователя и скорости его нарастания.

6. Разработан алгоритм программного обеспечения, позволяющий реализовать предложенный способ повышения работоспособности преобразователей электровоза и способ определения тиристорных плеч, не принявших токовую нагрузку.

7. Уточнена математическая модель системы «Тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз» в режиме рекуперативного торможения, позволяющая исследовать электромагнитные процессы штатной и аварийной работы ВИП электровоза, а также с предлагаемым способом управления преобразователя, обеспечивающим сохранения режима рекуперативного торможения и возврат электрической энергии в контактную сеть при пропусках импульсов управления.

8. Проведена оценка адекватности математической модели по параметрам электромагнитных процессов, полученных на реальном электровозе в эксплуатации, разница которых составила не более 10%.

9. По результатам проведенных исследований электромагнитных процессов ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения при пропусках импульсов управления с предложенным способом управления получено, что:

- с высокой точностью выявляется тиристорное плечо ВИП, не принявшее токовую нагрузку при пропусках импульсов управления, за счет анализа длительности коммутации тока (в 2,5 раза меньше по сравнению со штатной работой) и скорости его нарастания (в 3 раза выше по сравнению со штатной работой);

- исключается образование тока короткого замыкания в силовых цепях электровоза, величина которого достигает свыше 7000 А;

- в целом повышается работоспособность электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, а также безопасность движения грузовых и пассажирских поездов на участках с горным профилем пути.

10. Годовой экономический эффект от внедрения разработанного алгоритма управления ВИП, повышающего работоспособность режима рекуперативного торможения в расчете на один трехсекционный электровоз составит 528,43 тыс. руб. при сроке окупаемости 0,2 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК:

1. **Устинов Р. И.** Моделирование аварийных процессов выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза при пропуске управляющих импульсов. / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко. // Вестник ИРГТУ / Иркутский гос. техн. ун-т, 2018. № 3. С. 244 – 254.

2. **Устинов Р. И.** Разработка способа оценки образования короткого замыкания в силовых цепях инвертора электровоза / О.В. Мельниченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 35 – 44.

Статья в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus:

3. Ivanov, V.S. Increasing Energy Efficiency and Reliability of Electric Multiple Unit Regenerative Braking / V.S. Ivanov, **R.I. Ustinov**, O.V. Melnichenko // VIII International Scientific Siberian Transport Forum: TransSiberia 2020, Volume 1, pp 420-426.

Авторские свидетельства и патенты:

4. **Устинов Р. И.**, Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Шрамко С. Г., Линьков А. О., Яговкин Д. А. Способ повышения работоспособности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения и устройство для его реализации // Пат. 2659756 Российская Федерация, МПК В60L 9/12, В60L 7/16, Н02Р 7/295, Н02М 7/1555, В60L 2200/26; завл. 24.11.2016; опубл. 03.07.2018, Бюл. № 19.

5. **Устинов Р. И.**, Мельниченко О. В., Линьков А. О., Портной А. Ю., Шрамко С. Г. Программа для управления и защиты от аварийных режимов работы выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в ресурсосберегающем режиме – рекуперативном торможении // Свид. № 2019661661 РФ; опубл. 05.09.2019.

Публикации в других изданиях:

6. **Устинов Р. И.** Повышение работоспособности ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при пропуске импульсов управления / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, Ю.В. Газизов. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы седьмой международной науч.- практ. конф. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2016. Т. 2 – С.517 – 520.

7. **Устинов Р. И.** Разработка нового алгоритма управления ВИП в случае пропуска импульсов управления в режиме рекуперативного торможения / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко. // Наука и молодежь: Сборник трудов второй всерос. науч.- практ. конф. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2016. – С.256 – 259.
8. **Устинов Р. И.** Способ повышения работоспособности ВИП электровоза переменного тока при пропуске импульсов управления в режиме рекуперативного торможения / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко. // Вестник Института тяги и подвижного состава / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. Хабаровск, 2016. – Вып. 12. – С. 64 – 67.
9. **Устинов Р. И.** Выпрямительно-инверторный преобразователь для электровозов переменного тока с коллекторными ТЭД в режиме рекуперативного торможения / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.О. Линьков, С.Г. Шрамко, Д.А. Яговкин // Вестник Института тяги и подвижного состава / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. Хабаровск, 2016. – Вып. 12. – С. 67 – 69.
10. **Устинов Р. И.** Повышение работоспособности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет использования сигналов датчиков коммутации / Р.И. Устинов. // Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности: Сборник научных трудов международной науч.- практ. конф. / Санкт-Петербургский Центр Системного Анализа. Санкт-Петербург, 2017. – С. 58 – 60.
11. **Устинов Р. И.** Повышение безопасности движения поездов при использовании ресурсосберегающего режима – рекуперативное торможение. / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко, Савельев А.В., Иванов В.С. // Безопасность транспорта и сложных технических систем глазами молодежи. Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции, 10-13 апреля 2018, Иркутск, 2018. С. 208 – 212.
12. **Устинов Р. И.** Определения пропусков импульсов управления с использованием сигналов датчиков угла коммутации. / О.В. Мельниченко // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы девятой международной науч.- практ. конф. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2018. Т. 2 – С.346 – 350.
13. **Устинов Р.И.** Обзор перспектив повышения энергетической эффективности и надёжности рекуперативного торможения на электроподвижном составе. / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.О. Линьков, С.Г. Шрамко, Д.А. Яговкин, И.А. Барин, В.С. Иванов. // Электропривод на транспорте и в промышленности. Сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции, 20-21 сентября 2018 г., Хабаровск: ДВГУПС 2018. – С. 212 – 219.
14. **Устинов Р.И.** Способ определения пропусков импульсов управления на тиристоры инвертора электровоза переменного тока / Р.И. Устинов // Scientific research – 2018: Proceedings of articles the III International scientific conference. Сборник трудов международной научно-практической конференции, 29-30 Ноября 2018, Чехия, Карловы Вары - Россия, Москва, С. 150 – 156.

Устинов Роман Иванович

Повышение работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать «__» февраля 2020 г. Заказ № _____

Формат 60×90. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Глазковская типография, г. Иркутск