

На правах рукописи



СУПРУН Демьян Андреевич

**СИСТЕМА АЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-  
ИНВЕРТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Хабаровск – 2024 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» на кафедре «Электротехника, электроника и электромеханика».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Скорик Виталий Геннадьевич**

Официальные оппоненты: **Колпахчян Павел Григорьевич**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Электрическая тяга», профессор.

**Табаров Бехруз Довудходжаевич**  
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится « 02 » июля 2024 г. в 15:15 на заседании диссертационного совета 44.2.001.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС) по адресу: Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ДВГУПС и на сайте (<https://dvgups.ru/>) в разделе «Аспиранту» – «Диссертационные советы» – «Диссертационный совет 44.2.001.01 (Д 218.003.07)» – «Объявления о защитах».

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета 44.2.001.01 по адресу: Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47.

Автореферат разослан « 29 » апреля 2024 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Ю.С. Кабалык

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Стратегия развития холдинга ОАО «Российские железные дороги» на период до 2030 года предусматривает проведение разработок и реализацию научно-технических мероприятий и проектов, направленных на снижение всех видов затрат по перевозочным видам деятельности и рост уровня надежности и безопасности функционирования сложных технических систем железнодорожного транспорта.

Силовые полупроводниковые преобразователи, применяемые на современных электровозах переменного тока с коллекторным электроприводом, являются ключевым звеном в процессах регулирования уровня напряжения на тяговых электродвигателях. Их надежность и долговечность определяет стабильность технологического процесса и эффективность грузо- и пассажироперевозок. Однако, в процессе эксплуатации возникают различные неисправности выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) электровозов. Неисправности могут быть неустраняемые, появление которых исключает возможность дальнейшей эксплуатации преобразователя (например, пробой тиристорного плеча) и устранимые, при появлении которых дальнейшая работа ВИП возможна (непринятие плечом токовой нагрузки). Основной причиной непринятия токовой нагрузки плечом является нарушение целостности цепей управления. Согласно статистике, на долю отказов цепей управления приходится около 15% от всего количества отказов. На основании вышеизложенного, данная работа, посвященная решению проблемы сохранения работоспособности силового преобразователя при непринятии токовой нагрузки одним из плеч, является актуальной.

### **Степень разработанности темы.**

Разработке теории и практического применения систем, способов диагностирования и защите полупроводниковых преобразователей напряжения на электровозах переменного тока посвящено множество публикаций отечественных и зарубежных ученых и специалистов: Капустин Л.Д., Голованов В.А., Бурдасов Б.К., Шабалин Н.Г., Перцовский М.Л., Мазнев А.С., Савоськин А.Н., Пиксаев В.М., Бабичук А.К., Лозановский А.Л., Плакс А.В., Власьевский С.В., Дениско Н.П., Семченко В.В., Лакин И.К., Донской А.Л., Мельниченко О.В., Бузмакова Л.В., Wei X.W., Bruyant A. и др. Однако, технические решения, предложенные в работах этих ученых не обеспечивают выявление плеча, не принявшего токовую нагрузку, в условиях движения электровоза, либо требуют для этого изменение конструкции ВИП или применение большого количества дополнительного оборудования. Также в этих работах не решен вопрос обеспечения максимально возможных тягово-энергетических показателей работы электровоза при неотпирании одного из тиристорных плеч.

**Объектом исследования** является ВИП электровоза переменного тока в режиме тяги.

**Предметом исследования** являются электромагнитные процессы ВИП в режиме выпрямителя при непринятии плечом токовой нагрузки.

**Целью работы** является обеспечение работоспособности электровоза переменного тока в случае непринятия тиристорным плечом ВИП токовой нагрузки за счет выявления отказавшего плеча и осуществления адаптации алгоритма управления плечами.

**Для достижения поставленной цели** в работе решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих технических решений для выявления факта неотпираания одного из тиристорных плеч силового преобразователя электровоза;
2. Разработана математическая модель системы «тяговая сеть - электровоз в режиме тяги» для анализа электромагнитных переходных процессов в цепях ВИП в различных режимах;
3. Выполнен математический анализ электромагнитных процессов в цепи выпрямленного тока ВИП и выявлены характерные признаки непринятия плечом ВИП токовой нагрузки;
4. Разработаны логические схемы выявления плеча ВИП, не принявшего токовую нагрузку;
5. Разработан алгоритм альтернативного управления ВИП при непринятии плечом токовой нагрузки;
6. Выполнена проверка предложенного алгоритма альтернативного управления ВИП на имитационной и физической моделях.

**Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель ВИП электровоза в режиме тяги, позволяющая провести исследование электромагнитных процессов его работы, с целью выявления связи между возможными отказами элементов и их диагностическими признаками.
2. Разработан принцип оценки состояния силового преобразователя в реальном времени для выявления факта непринятия тиристорным плечом токовой нагрузки и определения номера этого плеча.
3. Разработан алгоритм альтернативного управления ВИП при непринятии токовой нагрузки одним из тиристорных плеч.
4. Разработан принцип адаптации моментов подачи импульсов управления на плечи ВИП при реализации алгоритма альтернативного управления.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Предложены технические решения, позволяющие реализовать контроль над преобразователем при непринятии тиристорным плечом ВИП токовой нагрузки.
2. Разработан программный продукт, позволяющий осуществить определение неоткрывшегося плеча и подачу импульсов управления в соответствии с предложенным альтернативным алгоритмом.
3. Создана физическая модель, позволяющая проводить дальнейшее исследование электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза.

**Методология и методы исследования.**

На этапе анализа переходных процессов в цепи выпрямленного тока, а также при формировании основных принципов работы алгоритмов выявления плеча, не принявшего токовую нагрузку, и адаптивного управления, исследования проводили-

лись в программном пакете компьютерной алгебры Maple Maplesoft. Проверка работоспособности предлагаемых алгоритмов выполнялась на имитационной модели в пакете прикладных программ MATLAB Simulink с включением в процесс факторов, соответствующих реальным условиям эксплуатации ВИП. Возможность реализации разработанных алгоритмов в виде программно-технического комплекса проверена на физической модели.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

Математическое моделирование и непрерывный анализ параметров различных режимов работы выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза.

Логическая взаимосвязь параметров режима работы силового преобразователя при потере управления тиристорным плечом.

Алгоритм альтернативного управления выпрямительно-инверторным преобразователем при непринятии токовой нагрузки одним из плеч.

Адаптация углов управления тиристорными плечами ВИП при применении альтернативного управления.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность научных положений и результатов подтверждена: сравнением результатов имитационного моделирования с осциллограммами электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза с помощью регрессионного анализа; результатами физического моделирования разработанных алгоритмов на лабораторном стенде.

Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на: Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные вопросы энергетики», Благовещенск, ДальГАУ, 2019; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава», Красноярск, ДЦВ КрЖД, 2020; Международной научной конференции «International Transport Scientific Innovation (ITSI-2021)», Москва, РУТ (МИИТ), 2021; пленарной секции 6-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов», Омск, ОмГУПС, 2021; Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке», Хабаровск, ДВГУПС, 2022; XXV Хабаровском краевом конкурсе молодых ученых (секция «Технические и химические науки»), Хабаровск, ТОГУ, 2023; научных семинарах кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», Хабаровск, ДВГУПС, 2020-2023.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 15 научных работах, в том числе в 5 ведущих рецензированных научных изданиях (из перечня ВАК Минобрнауки России), одна в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus. Зарегистрирован патент на изобретение. Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Личное участие автора** в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в: проведении анализа существующих технических решений для выявления факта неотпирания одного из тиристорных плеч силового преобразователя электровоза; дополнении математической модели системы «тяговая сеть – электро-

воз в режиме тяги» системой выявления плеча, не принявшего токовую нагрузку и организации альтернативного управления выпрямительно-инверторным преобразователем; выявлении и обосновании с помощью модели характерных признаков и критериев определения плеча, не принявшего токовую нагрузку; разработке алгоритма альтернативного управления ВИП в случае непринятия плечом токовой нагрузки; создании физической модели для проверки предложенных в работе технических решений и проведении испытаний на этой модели.

Основные результаты диссертационной работы получены лично автором. В совместных публикациях автор принимал непосредственное участие в постановке и решении задачи, и в обсуждении результатов.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.9.3 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация: п. 1. – «Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава и систем тягового электроснабжения, повышение их эксплуатационной надежности и работоспособности. Системы электроснабжения железных дорог, промышленного железнодорожного транспорта, рельсового городского транспорта и метрополитенов. Методы и средства снижения энергетических потерь, обеспечения энергетической безопасности тяги поездов и электроснабжения железных дорог»; п. 3. – «Техническая диагностика подвижного состава и систем электроснабжения. Критерии оценки технического состояния подвижного состава и систем электроснабжения железных дорог и метрополитенов. Автоматизация процессов технической диагностики и мониторинга технического состояния этих объектов, бортовые, мобильные и встроенные устройства диагностики».

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, 3 приложений, библиографического списка из 111 наименований. Содержит 171 страницу основного текста, 15 таблиц и 111 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, описаны основные направления проводимых исследований.

**В первой главе** выполнен обзор отечественных и зарубежных технических решений, выполняющих функции защиты и диагностики силового преобразователя электровоза. Также рассмотрены существующие решения по организации управления преобразователем при непринятии одним из плеч токовой нагрузки. На основании анализа существующих решений, определены цель и сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** на основе существующей структуры ВИП (рис.1) поэтапно представлена разработка системы выявления факта пропуска полупериода и определения номера тиристорного плеча, не принявшего токовую нагрузку. Выполнен анализ отличительных особенностей параметров нормального и ненормального режимов работы ВИП.

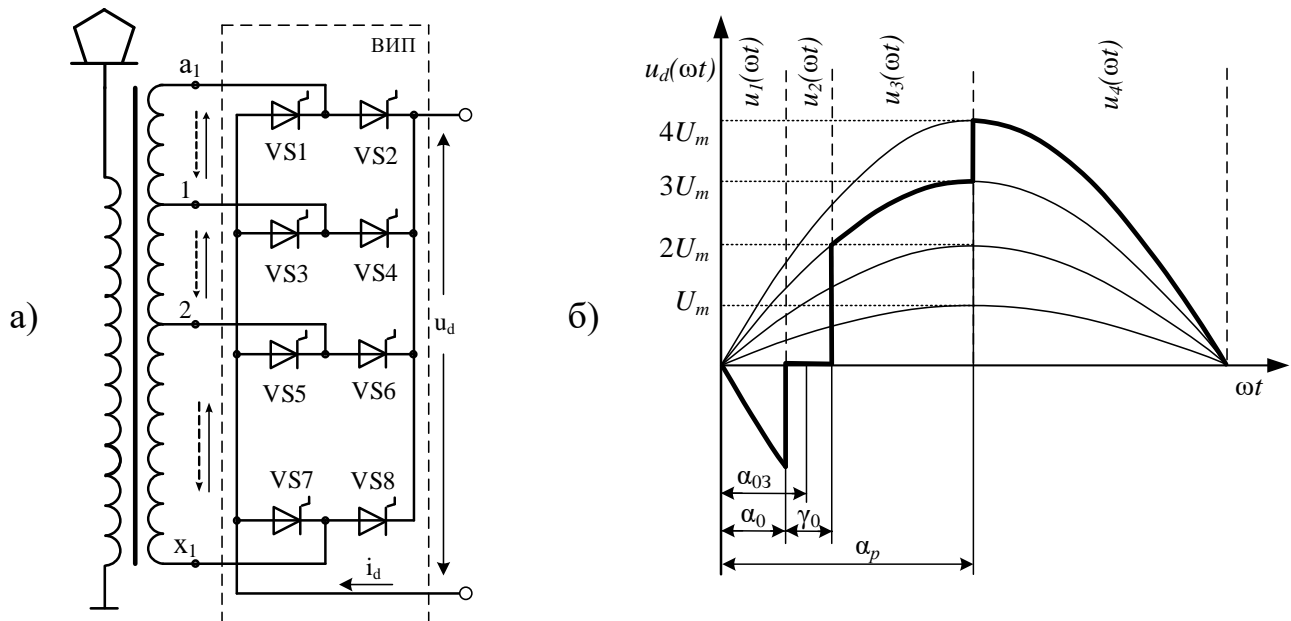


Рис. 1. Упрощенная схема ВИП (а) и временная диаграмма зонно-фазового способа регулирования напряжения (б)

Для проведения этого анализа разработана математическая модель, функционально описывающая электромагнитные процессы в цепи выпрямленного тока в различных режимах. Расчет переходных процессов выполнен в пакете компьютерной алгебры Maplesoft Maple с применением метода интеграла Дюамеля. Адекватность математической модели для исследования электромагнитных процессов подтверждена путем сравнения результатов, полученных аналитически, с реальными кривыми, записанными в ходе опытных испытаний электровоза на участке Дальневосточной железной дороги. Значения коэффициента детерминации для кривой напряжения и тока соответственно равны 0,99 и 0,95.

Результаты математического моделирования показали, что в исправном состоянии силового выпрямителя электромагнитные процессы, происходящие в нем, для двух следующих друг за другом полупериодов напряжения тяговой сети практически одинаковы. При нарушении штатного алгоритма управления преобразователем, в частности, при непринятии одним из плеч токовой нагрузки, возникает несимметрия процессов в двух смежных полупериодах напряжения. Появление данной несимметрии позволяет в качестве критериев наличия аварийного режима использовать два типа характерных показателей: гармонических, определяемых по кривой выпрямленного напряжения и энергетических, рассчитываемых за один полупериод сетевого напряжения.

*Гармонические показатели* реализованы в виде безразмерных величин, полученных через отношение амплитуд нечетных гармоник к постоянной составляющей выпрямленного напряжения. Нечетные гармоники задействованы в связи с тем, что в нормальном режиме в кривой выпрямленного напряжения они практически отсутствуют из-за ее осевой симметрии. При повреждении любого тиристорного плеча, из всего спектра нечетных гармоник напряжения возникает существенное изменение 1, 3 и 5 гармонических составляющих ( $U_1, U_3, U_5$ , соответственно). Использование для выявления аварийного режима этих гармоник исключает влияние на стабильность ее работы высокочастотных коммутационных и послекоммутационных свободных колебаний напряжения.

На рис. 2 представлены графики изменения величины первой гармоники выпрямленного напряжения относительно постоянной составляющей напряжения  $U_1/U_0$  при неотпирании плеч для различных значений угла регулирования  $\alpha_p$ . В качестве примера рассмотрена работа преобразователя на IV зоне регулирования.

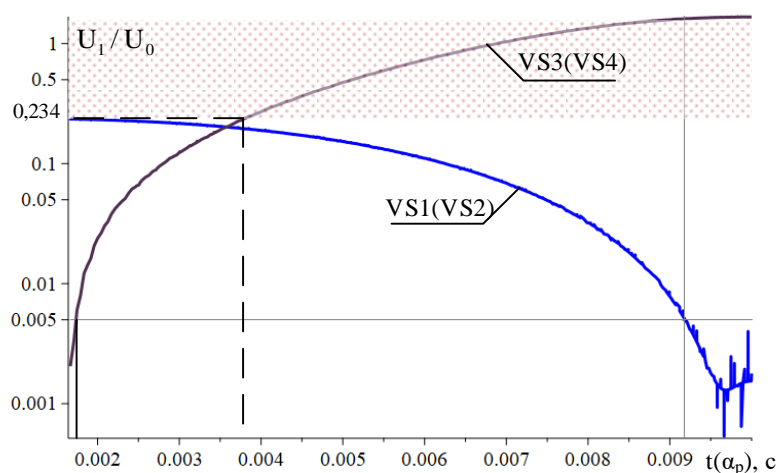


Рис. 2. Зависимости  $U_1/U_0(\alpha_p)$  при непринятии плечом VS1 (VS2) или VS3 (VS4) токовой нагрузки

ность обеспечивается в диапазоне  $[32^\circ; 180^\circ]$ .

Граничные условия определения неотпирания плеча получены в ходе анализа гармонического состава кривой выпрямленного напряжения с учетом коэффициента запаса. Отсутствие возможности обеспечивать чувствительность к появлению по-

При отсутствии управления тиристорным плечом VS1 (или VS2, в зависимости от полярности переменного сетевого напряжения) необходимая чувствительность к появлению повреждения обеспечивается в диапазоне  $[\alpha_0 + \gamma_0; 165^\circ]$ , где  $\alpha_0$  — угол нерегулируемых импульсов управления в начале каждого полупериода напряжения,  $\gamma_0$  — длительность сетевой коммутации после подачи сигнала с фазой  $\alpha_0$ . В случае непринятия плечом VS3 (VS4) токовой нагрузки, чувствитель-



вреждения во всем диапазоне не критично, поскольку потеря управления соответствующими плечами вне указанного диапазона не приведет к существенному снижению энергоотдачи преобразователем. Сам факт появления повреждения будет выявлен, как только при управлении угол фазового регулирования попадет в зону чувствительности.

На рис. 3 представлены графики изменения относительных величин третьей гармоники выпрямленного напряжения  $U_3/U_0$  при неотпирании плеч для различных значений  $\alpha_p$ . Диаграммы  $U_3/U_0(\alpha_p)$  построены для тех же видов повреждений во всем диапазоне углов фазового регулирования.

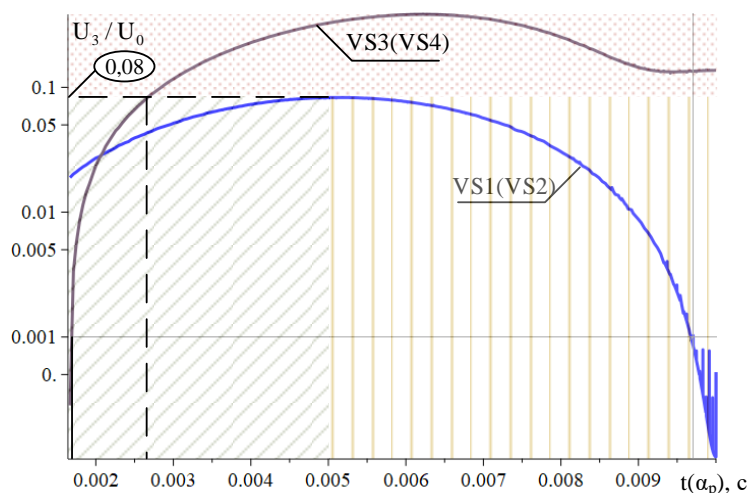


Рис. 3. Зависимости  $U_3/U_0(\alpha_p)$  при непринятии плечом VS1 (VS2) или VS3 (VS4) токовой нагрузки

нулевой гармонике напряжения ( $U_5/U_0$ ) при различных углах фазового регулирования.

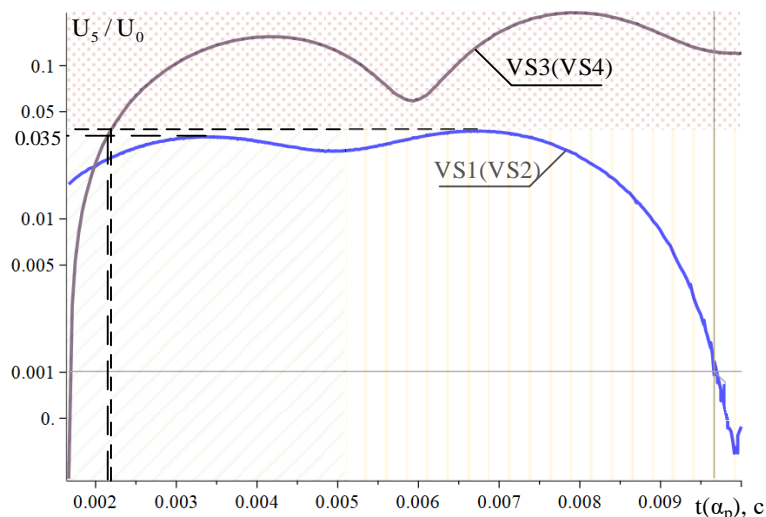


Рис. 4. Зависимости  $U_5/U_0(\alpha_p)$  при непринятии плечом VS1 (VS2) или VS3 (VS4) токовой нагрузки

Для  $U_3/U_0$ , зона чувствительности наличия потери управления VS3 (VS4) будет находиться в интервале  $[32^\circ; 180^\circ]$ , VS1 (VS2) –  $[\alpha_0 + \gamma_0; 174^\circ]$ . Полученные границы для данного соотношения несколько шире, чем для  $U_1/U_0$ .

Идентификация номера поврежденного плеча в данном случае имеет свою особенность: из-за формы  $U_3/U_0(\alpha_p)$  диапазон уверенного определения пропуска импульсов управления составляет  $[48^\circ; 180^\circ]$ .

На рис.4 рассмотрено влияние потери управления плечами на отношение амплитуд пятой к

Учитывая границу отстройки от нормального режима ВИП, получены следующие диапазоны срабатывания:  $[\alpha_0 + \gamma_0; 173^\circ]$  при пропуске импульса управления плечом VS1 (VS2), и  $[32^\circ; 180^\circ]$  при пропуске импульса управления плечом VS3 (VS4).

Переходя к разграничению повреждений по уровню соотношений гармоник напряжения, следует отметить, что при повреждении VS1 (VS2) кривая  $U_5/U_0(\alpha_p)$ , в отличие от предыдущих случаев, имеет два экстремума (до и после угла  $\alpha_p = 90^\circ$ ),

отличающихся по уровню.

Зависимости гармонических показателей, при потере управления опорными плечами VS7 (VS8) на графиках не представлены, так как параметры аварийного режима при таком повреждении значительно отличаются от нормального и могут быть выявлены при любом угле  $\alpha_p$ .

Энергетические показатели основаны на изменении отношения энергии, передаваемой в цепь выпрямленного тока за предыдущий полупериод, соответствующий нормальному режиму работы преобразователя ( $E_{dE}$ ), и аварийный ( $E_{dK}$ ), в течение которого произошло неотпирание одного из его плеч.

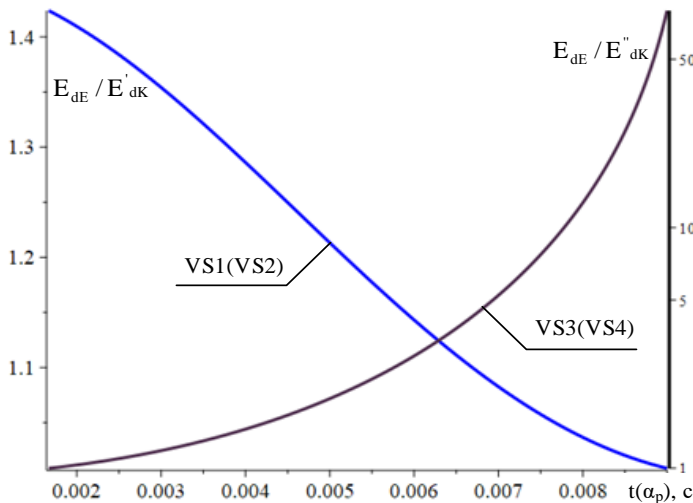


Рис. 5. Диаграммы  $E_{dE}/E_{dK}(\alpha_p)$  при непри-  
нятии плечом токовой нагрузки

На рис.5 представлены кривые  $E_{dE}/E_{dK}(\alpha_p)$  на IV зоне регулирования в зависимости от номера плеча, не принявшего токовую нагрузку. Для обоих представленных графиков минимальным отношением энергий является значение, равное единице. При выборе граничных значений фиксации ненормального режима учтено возможное изменение рабочего режима за полпериода и погрешность расчета.

На основе представленных показателей были разработаны три энергетических критерия:

1) отношение интеграла мощности, полученного за контрольный (текущий) полупериод, к аналогичной величине за предшествующий полупериод ( $1/2T$ ):

$$dE_{1/2T} = \frac{\int_{\pi(m-1)}^{\pi(m+1)} u_d(t) \cdot i_d(t) dt}{\int_{\pi m}^{\pi m} u_d(t) \cdot i_d(t) dt}, \quad (1)$$

где  $u_d(t)$  – функция кривой выпрямленного напряжения на выводах ВИП;

$i_d(t)$  – функция кривой выпрямленного тока в цепи тяговых двигателей.

2) отношение интеграла мощности, полученного за контрольную четверть периода ( $1/4T$ ), к аналогичной величине за предшествующий полупериод:

$$dE_{1/4T} = \frac{\int_{\pi(m-1/2)}^{\pi(m+1/2)} u_d(t) \cdot i_d(t) dt}{\int_{\pi(m-1)}^{\pi(m-1)} u_d(t) \cdot i_d(t) dt}; \quad (2)$$

Критерий является эффективным при малых углах регулирования  $\alpha_p$  в случае неотпирания плеча, на которое штатно подаются импульсы с фазой  $\alpha_{03}$ .

3) отношение интеграла отрицательной составляющей напряжения  $u_d(t)$  за последующий полупериод относительно предшествующего:

$$u_p(t) = \frac{\int_{\alpha_p + \pi(m-1)}^{\alpha_p + \pi m} u_d(t) dt}{\pi(m-1)} \left| \begin{array}{l} \text{для } u_d(t) < 0. \\ \int_{\alpha_p + \pi(m-1)}^{\alpha_p + \pi m} u_d(t) dt \end{array} \right. \quad (3)$$

Данный критерий эффективен в случае неотпирания плеча, на которое штатно подаются импульсы с фазой  $\alpha_0$ .

Представленные критерии позволяют надежно идентифицировать факт нарушения нормальной работы ВИП в широком диапазоне углов регулирования  $\alpha_p$ . Использование относительных величин контролируемых сигналов в качестве критериев оценки состояния ВИП позволяет не использовать коррекцию граничных условий при изменении амплитуды сетевого напряжения.

Операции по считыванию, обработке и анализу параметров режима выполняются взаимосвязанными между собой блоками. Совокупность этих блоков образует систему (рис. 6), которая обеспечивает избирательное выявление номера тиристорного плеча, не принявшего токовую нагрузку в предыдущем полупериоде.

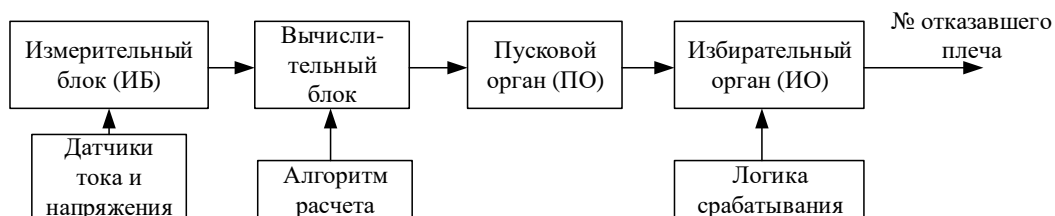


Рис. 6. Обобщенная структурная схема системы мониторинга ВИП

Информация, поступающая с датчиков тока и напряжения на выводах ВИП, проходит оцифровку и первичную обработку в измерительном блоке (ИБ). Далее вычислительный блок (ВБ), используя оцифрованные сигналы параметров режима (энергетические и гармонические критерии), формирует массив данных с помощью заложенного алгоритма расчета. При превышении каким-либо критерием пороговой величины, указывающей на отклонение работы ВИП от нормального режима, пусковой орган (ПО) формирует сигналы готовности системы мониторинга к срабатыванию. Сигналы со всех пусковых органов обрабатываются логическим избирательным органом (ИО), который при заданной комбинации пусковых сигналов формирует выходное воздействие системы. Полученная система позволяет оперативно выявить факт неотпирания одного из тиристорных плеч и определить номер плеча, не принявшего токовую нагрузку.

**В третьей главе** для проверки правильности принятых решений разработана имитационная модель системы «тяговая подстанция–тяговая сеть–электровоз». В состав модели включены: эквиваленты двух тяговых подстанций с обходной связью, тяговая сеть на основе каскадного соединения Г-образных четырехполюсников, эквивалент дополнительного электровоза на той же фидерной зоне, тяговый трансформатор, ВИП в режиме тяги с подключенными к нему через реакторы тяговыми двигателями, модуль управления преобразователем, модуль имитации обрывов цепей управления.

В качестве среды для разработки имитационной модели использована среда динамического моделирования сложных систем Simulink в составе пакета прикладных про-

грамм MATLAB. Оценка адекватности модели выполнена путем сравнительного анализа кривых напряжения: измеренных при испытаниях в процессе эксплуатации электровоза переменного тока и полученных при моделировании. Полученные по результатам регрессионного анализа значения коэффициентов детерминации показали высокую степень соответствия рассматриваемых кривых.

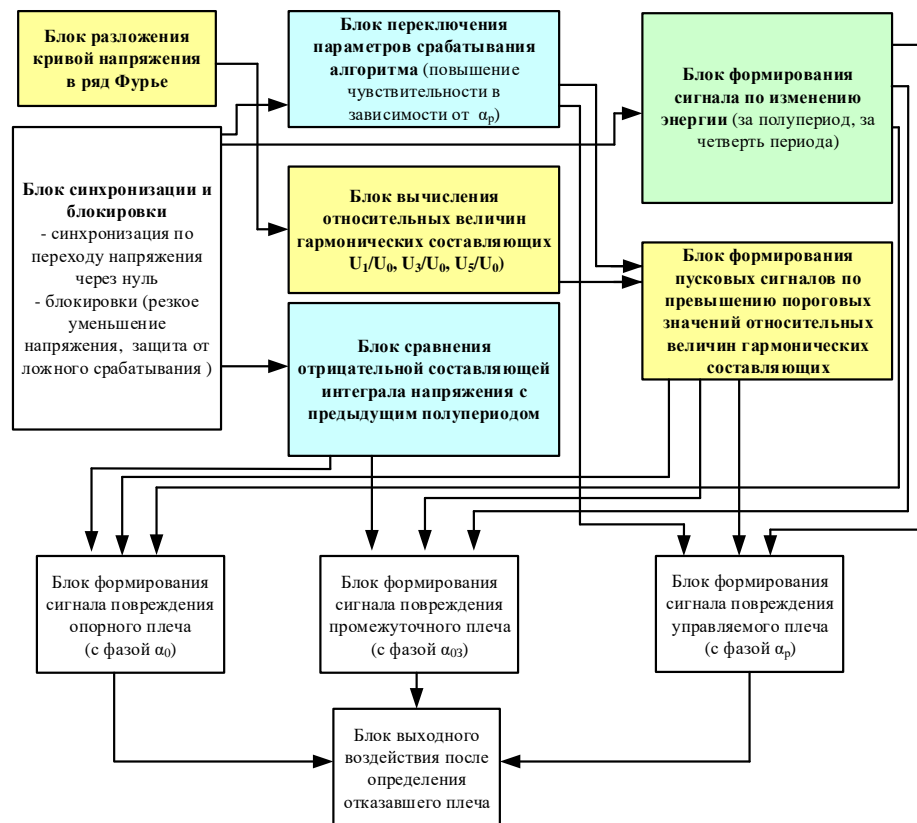


Рис. 7. Функциональная схема системы выявления отказавшего тиристорного плеча ВИП

После создания имитационной модели силового оборудования электровоза, был разработан модуль мониторинга состояния преобразователя. Схема модуля, рис. 7, содержит элементы вычислительного блока, пускового и избирательного органов, с учетом особенностей их реализации в MATLAB. Наиболее важной составляющей представленной схемы являются блоки, образующие избирательный орган. Данные блоки, путем логической обработки сигналов с органов пуска, обеспечивают избирательное определение плеча

ча, не принявшего токовую нагрузку. На рис. 8 представлены: логическая схема блока (рис. 8, а) выявления пропуска подачи импульсов управления на плечи VS7 или VS8 и осциллограмма работы данного блока (рис.8, б) при пропуске подачи импульса управления на плечо VS8 на IV зоне регулирования напряжения.

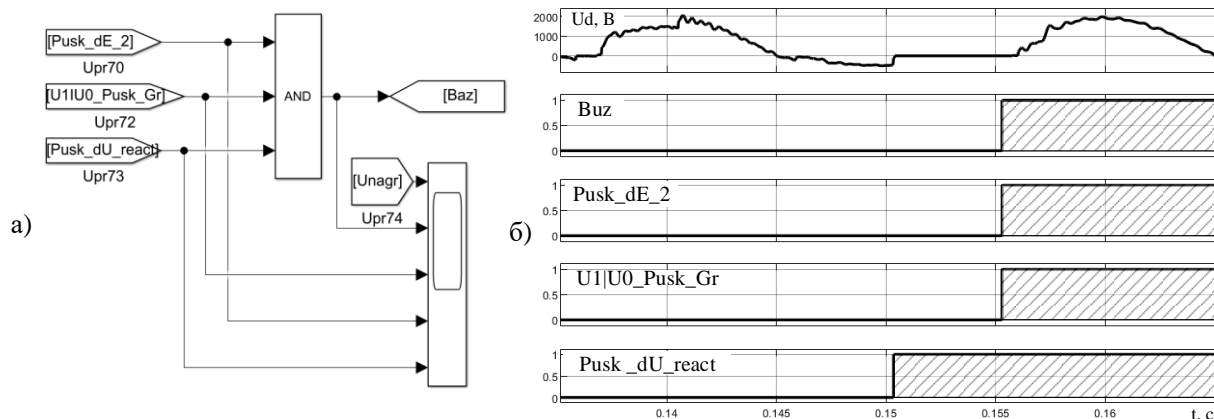


Рис. 8. Логическая схема блока выявления отказа плеча VS7(VS8) (а), осциллограмма работы блока (б)

Работа избирательного органа на IV зоне регулирования, в случае непринятия токовой нагрузки плечом VS3(VS4) представлена на рис. 9, VS1(VS2) – на рис. 10.

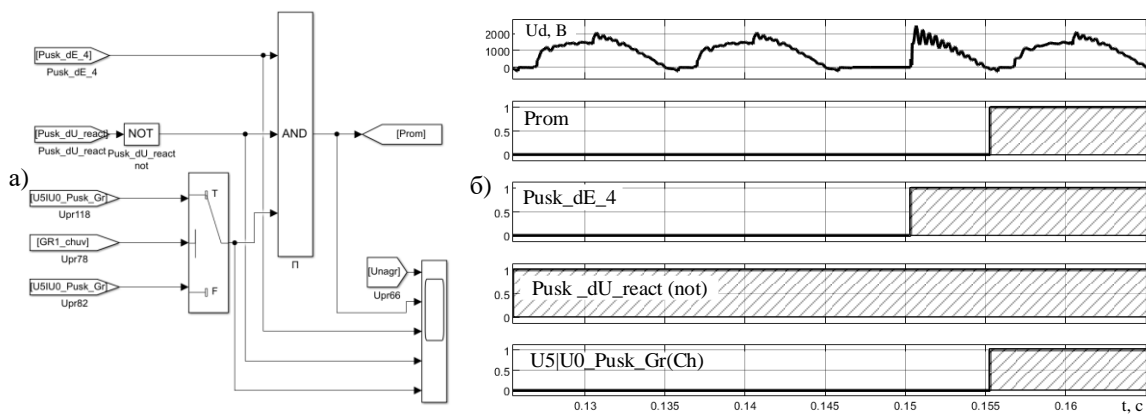


Рис. 9. Логическая схема блока выявления отказа плеча VS3(VS4) (а), осциллограмма работы блока (б)

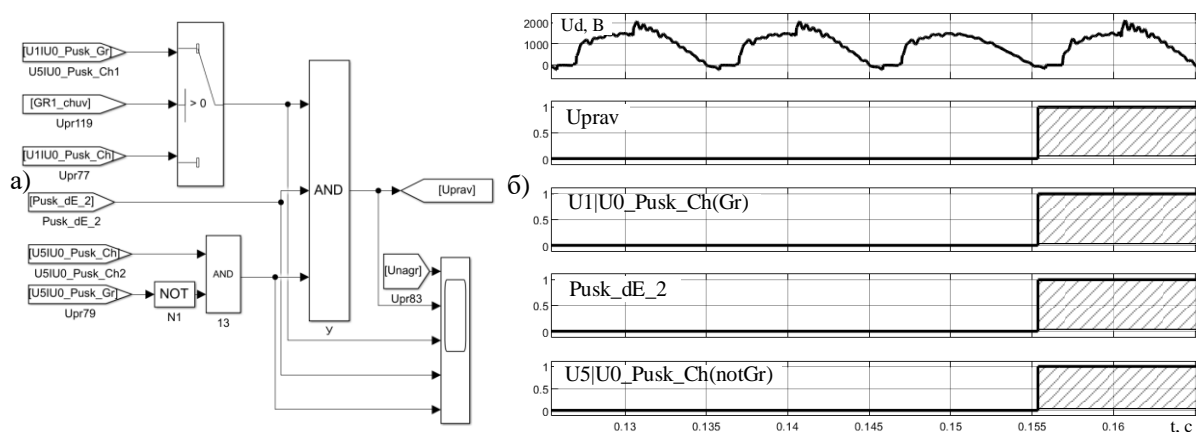


Рис. 10. Логическая схема блока выявления отказа плеча VS1(VS2) (а), осциллограмма работы блока (б)

Из представленных рисунков видно, что совместная работа пусковых органов обеспечивает селективное срабатывание избирательного органа. Таким образом, избирательные органы однозначно выявляют пару плеч, одно из которых не открылось. Для точной идентификации конкретного плеча из этой пары, необходимо совместить момент срабатывания избирательного органа с полярностью сетевого напряжения.

Представленные результаты имитационного моделирования подтвердили возможность обеспечить избирательное определение поврежденного тиристорного плеча в случае непринятия им токовой нагрузки. Даже в условиях значительного искажения кривой выпрямленного напряжения, предлагаемая система мониторинга надежно выявляет номер поврежденного плеча.

В четвертой главе разработан альтернативный алгоритм управления преобразователем при неотпирании одного из тиристорных плеч, с адаптацией углов фазового регулирования. В основу предлагаемого алгоритма заложен принцип применения только исправных плеч с целью обеспечения контроля над преобразователем и, по возможности, сохранения величины средневыврямленного напряжения. Порядок

подачи импульсов управления для реализации альтернативного алгоритма представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Альтернативный алгоритм управления ВИП, при отказе одного из тиристорных плеч

Зона регулирования (отказавшее плечо)	Полу-период	Распределение импульсов управления по плечам ВИП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
1 (VS3; VS4)	←	$\alpha_k$					$\alpha_0, \alpha_k$		
	→		$\alpha_k$			$\alpha_0, \alpha_k$			
1 (VS5; VS6)	←	$\alpha_0$			$\alpha_0, \alpha_p$				
	→		$\alpha_p$	$\alpha_0, \alpha_p$					
2 (VS5; VS6)	←			$\alpha_k$					$\alpha_0, \alpha_k$
	→				$\alpha_k$			$\alpha_0, \alpha_k$	
2 (VS3)	←	$\alpha_k$					$\alpha_0$		
	→		$\alpha_p$		$\alpha_{03}$	$\alpha_0$			
2 (VS4)	←	$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$		
	→		$\alpha_k$			$\alpha_0$			
2 (VS1; VS2)	←					$\alpha_k$			$\alpha_0, \alpha_k$
	→						$\alpha_k$	$\alpha_0, \alpha_k$	
3 (VS7; VS8)	←	$\alpha_{03}$					$\alpha_0$		
	→		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$			
3 (VS6)	←			$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$
	→				$\alpha_k$			$\alpha_0, \alpha_k$	
3 (VS5)	←			$\alpha_k$					$\alpha_0, \alpha_k$
	→				$\alpha_p$		$\alpha_{03}$	$\alpha_0$	
3 (VS4)	←			$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$
	→		$\alpha_k$				$\alpha_{03}$	$\alpha_0$	
3 (VS3)	←	$\alpha_k$				$\alpha_{03}$			$\alpha_0$
	→				$\alpha_p$		$\alpha_{03}$	$\alpha_0$	
4 (VS7; VS8)	←	$\alpha_{03}$					$\alpha_0$		
	→		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$			
4 (VS4)	←	$\alpha_p$		$\alpha_{03}$					$\alpha_0$
	→		$\alpha_k$				$\alpha_{03}$	$\alpha_0$	
4 (VS3)	←	$\alpha_k$				$\alpha_{03}$			$\alpha_0$
	→		$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$	
4 (VS2)	←	$\alpha_p$		$\alpha_{03}$					$\alpha_0$
	→				$\alpha_{03}$			$\alpha_0$	
4 (VS1)	←			$\alpha_{03}$					$\alpha_0$
	→		$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$	

В таблице 1 представлены скорректированные углы фазового регулирования ( $\alpha_k$ ) для различных условий адаптации управления. Введение корректировки угла

фазового регулирования обусловлено необходимостью сохранения доаварийного уровня средневыпрямленного напряжения на выводах преобразователя. Расчет значения углов  $\alpha_k$  производится исходя из доаварийных условий функционирования преобразователя. Принцип определения  $\alpha_k$  основан на перерасчете в течение полупериода интегрального значения кривой выпрямленного напряжения с учетом его видоизменения при введении альтернативного управления.

Для полупериода, в котором коммутации осуществляются в соответствии с типовым алгоритмом управления (эталонного полупериода) (рис. 1, б), величина средневыпрямленного напряжения определяется по выражению:

$$U_{cp} = \int_0^{\alpha_0} u_1(\omega t) d(\omega t) + \int_{\alpha_0}^{\alpha_0+\gamma_0} u_2(\omega t) d(\omega t) + \int_{\alpha_0+\gamma_0}^{\alpha_p} u_3(\omega t) d(\omega t) + \int_{\alpha_p}^{\pi} u_4(\omega t) d(\omega t) \quad (4)$$

Однако, при перестроении управления преобразователем, форма кривой выпрямленного напряжения изменяются относительно нормального режима. В качестве примера рассмотрен случай пропуска импульса управления с углом  $\alpha_{03}$  (например, VS3 или VS4, в зависимости от полупериода, на IV зоне регулирования). В данном случае можно реализовать сохранение средневыпрямленного напряжения за счет уменьшения угла  $\alpha_p$  импульсов, подаваемых на VS1(VS2) на IV зоне, рис. 11.

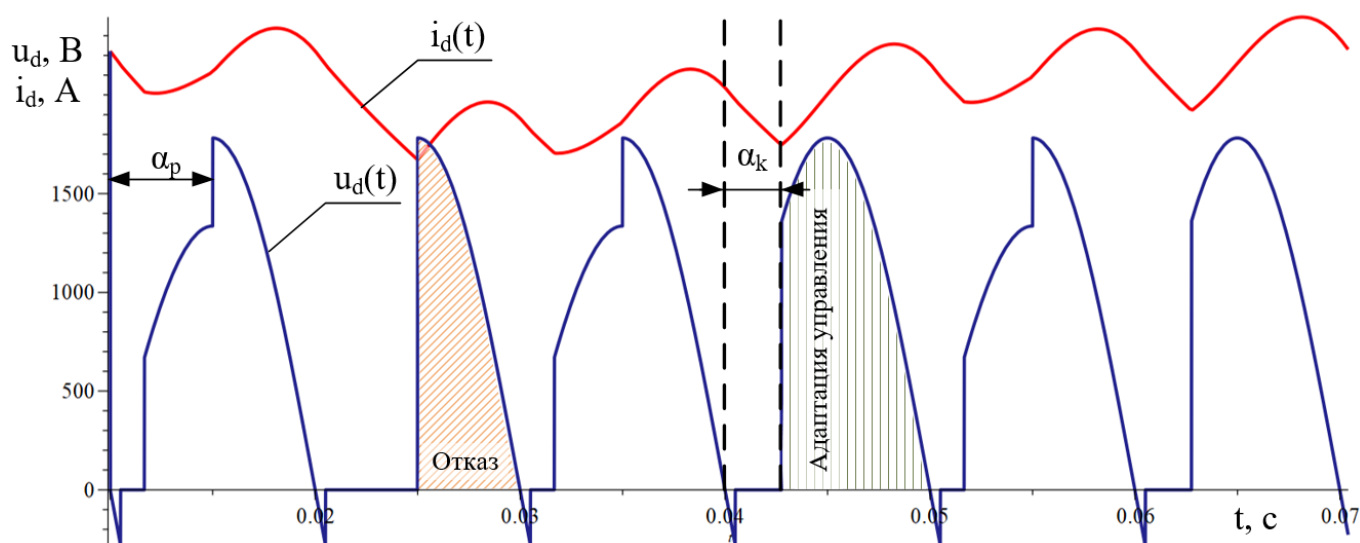


Рис. 11. Пример работы алгоритма альтернативного управления на IV зоне регулирования при неотпирании плеча VS3(VS4)

В таком случае скорректированный угол отпирания ( $\alpha_k$ ) может быть определен, исходя из уравнения:

$$U_{cp} + \int_0^{\alpha_0} u_1(\omega t) d(\omega t) + \int_{\alpha_k}^{\pi} u_4(\omega t) d(\omega t) = 0 \quad (5)$$

В результате решения этого уравнения, получена универсальная формула расчета угла альтернативного управления для различных зон регулирования:

$$\alpha_k = \arccos \left[ \frac{\cos(\alpha_0) - \cos(\alpha_0 + \gamma_0) + n \cdot \cos(\alpha_0 + \gamma_0)}{n} \right], \quad (6)$$

где  $n$  – номер зоны регулирования напряжения.

После разработки теоретических основ работы альтернативного управления, имитационная модель была дополнена соответствующим модулем. На рис. 12 представлены осциллограммы процесса перестроения управления и адаптации угла фазового регулирования.

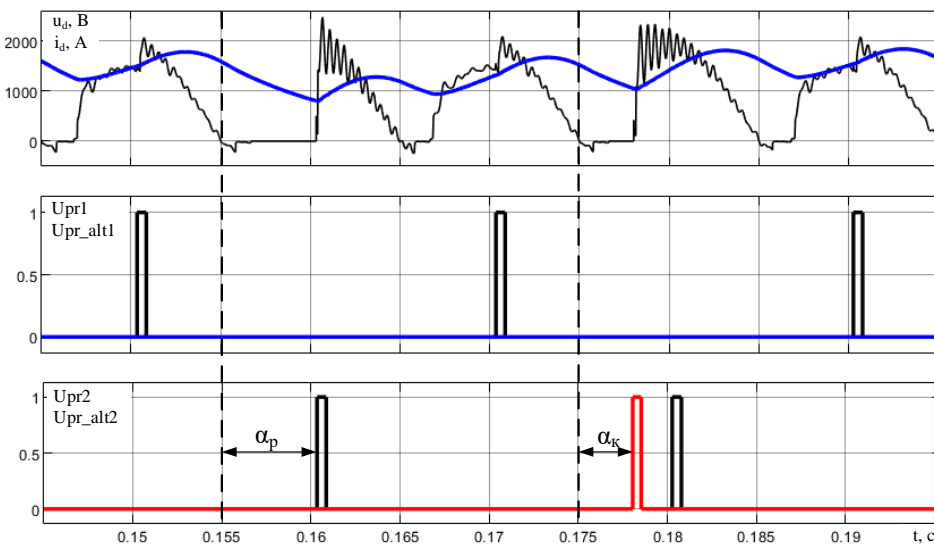


Рис. 12. Осциллограммы импульсов управления плечами VS1 и VS2

В результате работы модуля альтернативного управления, отпирание плеча VS1 при отказе VS3 осуществляется раньше, то есть  $\alpha_k < \alpha_p$ . На рис. 12 представлена осциллограмма импульсов управления плечами VS1 и VS2. Из осциллограммы видно, что измененный угол управления позволяет скомпенсировать снижение средневы-

прямленного напряжения при потере управления плечом VS3 и переходе на VS5. Уровень тока восстанавливается, обеспечивая сохранение тягового усилия на валу двигателей.

**В пятой главе** приведено описание физической модели и результаты комплексного моделирования алгоритмов мониторинга и альтернативного управления. Физическая модель создана на базе лаборатории «Электрические машины» ДВГУПС. В состав модели входят: силовая часть (силовой трансформатор, двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, дроссель, тиристоры), измерительная часть и цепи управления (датчики напряжения и тока, компоненты гальванической развязки, микроконтроллер STM32H7 со встроенными алгоритмами диагностики и управления (рис. 13), выходные управляющие цепи).

С момента запуска микропроцессорной системы активируется алгоритм управления и мониторинга ВИП. Производится считывание сигнала с выводов трансформатора и, в моменты восходящей нуль-индикации, блоком «Нуль-индикация по кривой напряжения на выводах трансформатора» формируются синхронизирующие импульсы. Отстраиваясь от этих импульсов, блок «Введение типо-



вого управления» выполняет подачу управляющих импульсов на тиристорные плечи, в соответствии с типовым алгоритмом. Далее выполняется анализ текущего состояния работы ВИП с точки зрения алгоритма управления. Если альтернативное управление в данный момент не введено, блоками «Разложение в ряд Фурье» и «Вычисление интегральных критериев по энергии» выполняется математическое преобразование кривых напряжения и тока в цепи двигателя.

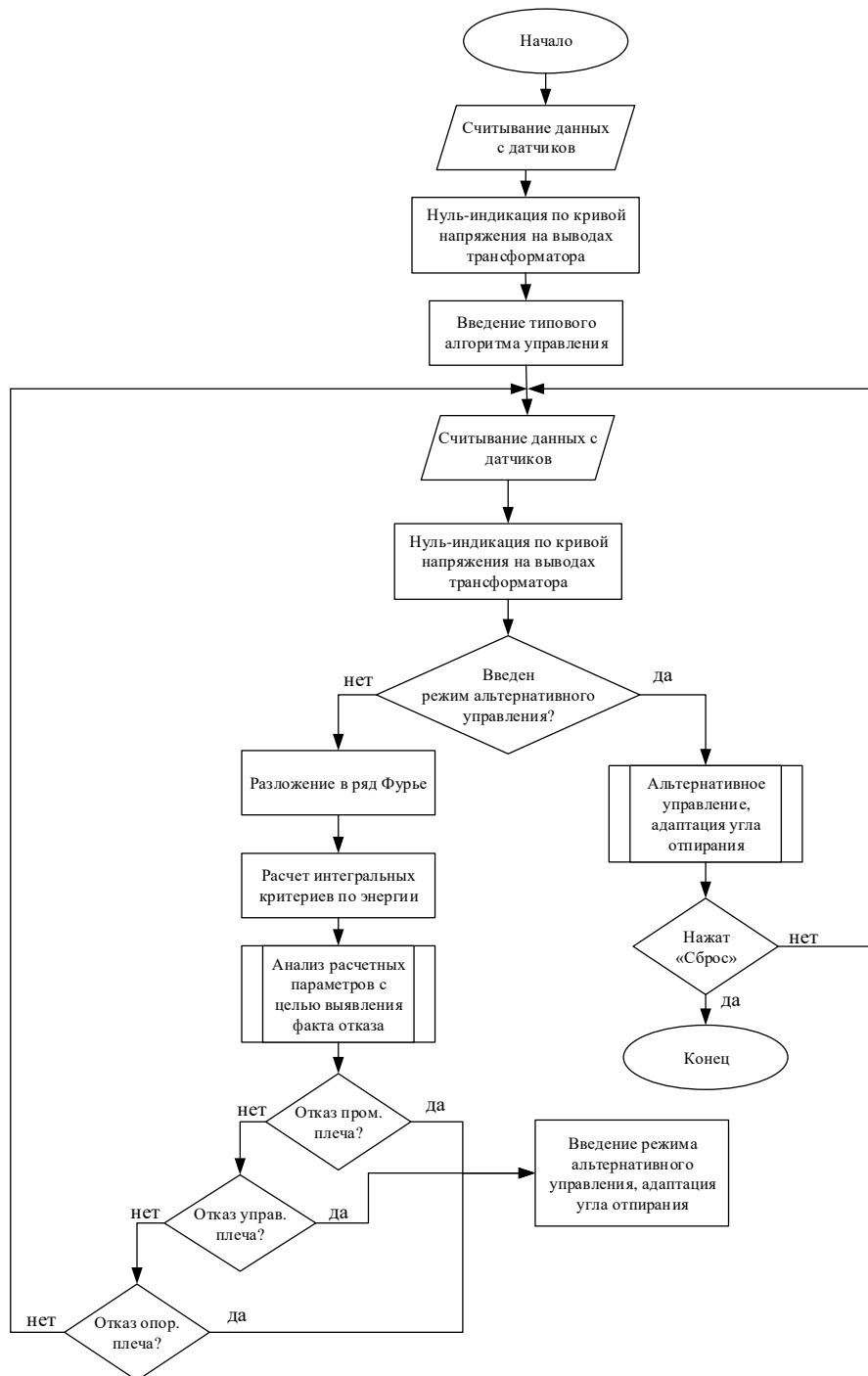


Рис. 13. Алгоритм основной ветви программы, обеспечивающий работу физической модели

Полученные в ходе математического преобразования параметры обрабатываются функцией «Анализ расчётных параметров с целью выявления факта отказа». При наличии условий для срабатывания, с помощью блока «Введение альтернативного управления, адаптация угла отпирания», вводится функция «Альтернативное управление, адаптация угла отпирания». В условиях срабатывания данной функции, преобразователь будет управляться по циклу альтернативного управления до момента нажатия кнопки «Сброс».

На рис. 14 представлен результат физического моделирования пропуска импульса управления плечом VS2 (рис. 14. а), VS3 (рис. 14. б), VS7 (рис. 14. в) на примере II зоны регулирования напряжения.

Система отработала в соответствии с заданным алгоритмом: выявлено плечо, не принявшее токовую нагрузку, и произведен переход на адаптивное управление

плечами VS8(VS7) – VS5(VS6). Из рисунка видно, что в течение аварийных полупериодов уровень тока в цепи двигателя снижается. Однако, после перестроения управления, с учетом особенностей коммутации тиристоров, уровень тока быстро восстанавливается до среднего уровня нормального режима работы ВИП.

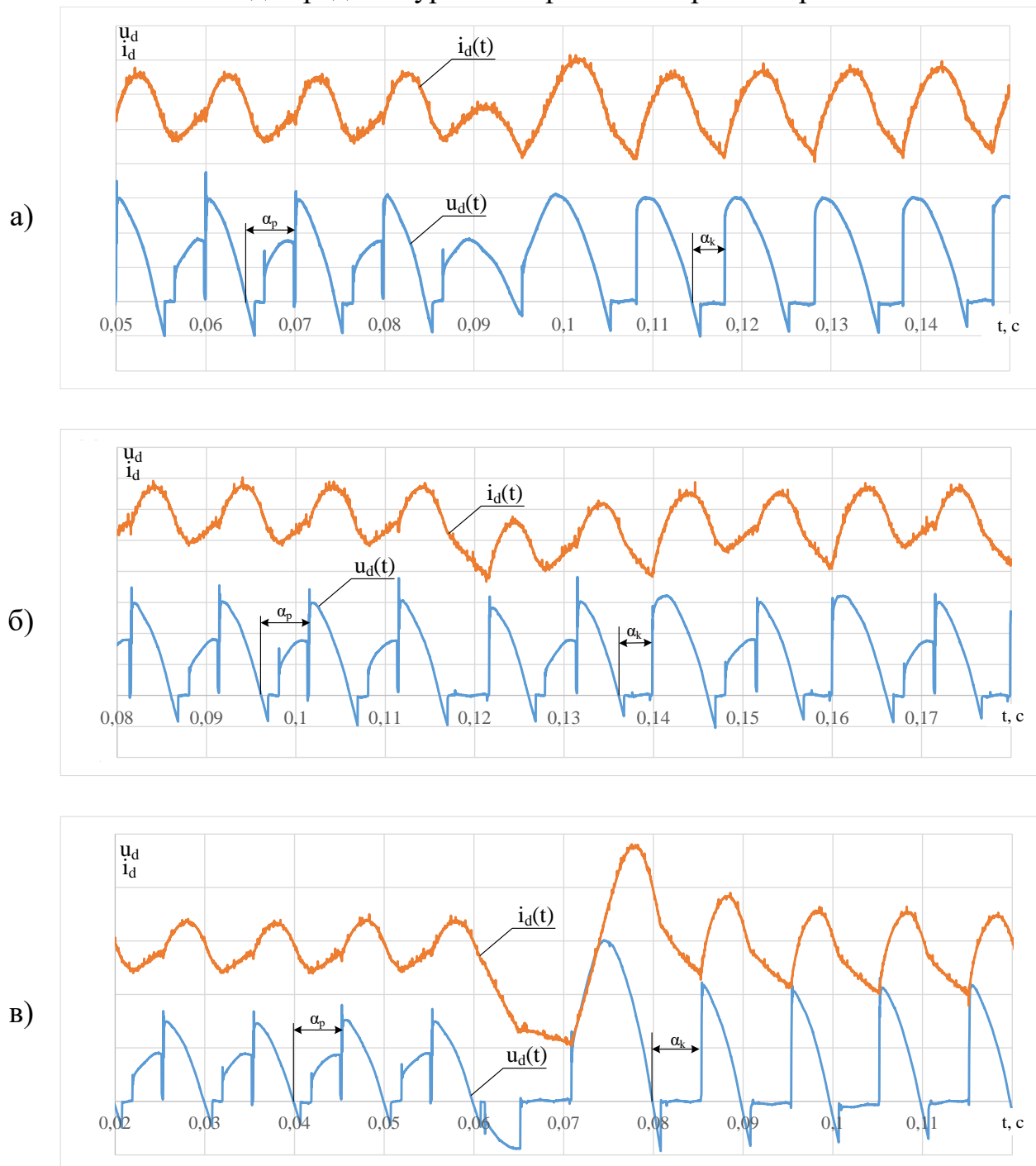


Рис. 14. Осциллограмма напряжения и тока в цепи двигателя при отказе плеча VS2 (а), VS3 (б), VS7 (в) на II зоне регулирования напряжения

Представленные результаты физического моделирования подтвердили возможность реализации разработанного алгоритма мониторинга и адаптивного управления в виде программно-аппаратного комплекса. Данный комплекс в полном объе-

ме выполняет функции мониторинга и обеспечивает управление ВИП в различных режимах. Созданная физическая модель может быть в дальнейшем использована при исследовании электромагнитных переходных процессов в силовых цепях современных электровозов с коллекторным приводом. Также эта модель вместе с измерительным комплексом может быть применена в образовательном процессе при преподавании специальных дисциплин.

### **Заключение**

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Выполнено исследование параметров аварийного режима при непринятии плечом токовой нагрузки. Выявлены показатели, позволяющие зафиксировать факт появления отказа тиристорного плеча ВИП. Сформированы критерии, обеспечивающие избирательное определения номера отказавшего плеча.
2. Разработан принцип выявления конкретного тиристорного плеча ВИП, не принявшего токовую нагрузку.
3. Разработан алгоритм альтернативного управления, позволяющий сохранить контроль над ВИП в случае отказа тиристорного плеча.
4. Разработан алгоритм адаптации углов фазового регулирования при введении альтернативного управления преобразователем.
5. Выполнена комплексная проверка алгоритма определения отказавшего плеча и альтернативного управления ВИП на имитационной модели. Проверка подтвердила возможность идентифицировать отказавшее плечо в соответствии с принятыми критериями и обеспечить сохранение контроля над преобразователем при использовании альтернативного управления.
6. Создана физическая модель, которая подтвердила возможность реализации разработанных решений в виде программно-аппаратного комплекса.
7. Проведено технико-экономическое обоснование эффективности внедрения предложенных решений. Годовой экономический эффект на одну секцию электровоза 2(3,4)ЭС5К составляет 37,3 тыс.руб./секц.×год. Срок окупаемости разработанной системы составил 1,8 года.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендуемых ВАК:**

1. Супрун, Д.А. Рабочее диагностирование тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока / В. Г. Скорик, Д.А. Супрун, Е.В. Буняева. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (54). – С. 63–73.
2. Супрун, Д.А. Применение интеграла Дюамеля для анализа электромагнитных процессов в силовых цепях электровозов переменного тока / Д.А. Супрун, В.Г. Скорик. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. № 1 (73). – С. 145–152.

3. Супрун, Д.А. Энергетический критерий выявления обрыва тиристорного плеча силового преобразователя электровоза переменного тока / Д.А. Супрун, В.Г. Скорик, О.А. Малышева. – Текст : электронный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2022. – №2. – С. 6–11.
4. Супрун, Д.А. Альтернативный алгоритм управления силовым преобразователем электровоза переменного тока в аварийных режимах / Д.А. Супрун, В.Г. Скорик, Е.В. Буняева, О.А. Малышева. – Текст : электронный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2022. – № 4-5. – С. 38–43.
5. Супрун, Д. А. Физическое моделирование системы мониторинга процесса управления силовым преобразователем электровоза переменного тока / Д.А. Супрун, Т.В. Бажеко, Я.В. Кузнецова, В.Г. Скорик Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2023. – № 3 (36). – С. 107–113.

#### **Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

6. Патент № 2 766 917 С1 Российская Федерация, МПК В60L 3/12(2006.01), Н02М 7/219(2006.01), Н02Р 7/295(2006.01). Способ определения аварийного плеча выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока : № 2021123002 : заявл. 29.07.2021 : опубл. 16.03.2022 / Скорик В.Г., Супрун Д.А., Блажнов А.И. : заявитель ФГБОУ ВО ДВГУПС. – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.
7. Свидетельство № 2022662831 о регистрации программы для ЭВМ. Реализация алгоритма диагностирования и адаптивного управления многозонным выпрямителем : № 2022662831 : заявл. 27.06.2022 : опубл. 07.07.2022 / Скорик В.Г., Супрун Д.А. : заявитель ФГБОУ ВО ДВГУПС.
8. Свидетельство №2022662831 о регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение для управления многозонным тиристорным выпрямителем (свидетельство о регистрации программного продукта) : №2022662831 : заявл. 27.06.2022 : опубл. 07.07.2022 / Супрун Д.А., Скорик В.Г., Бажеко Т.В., Кузнецова Я.В.: заявитель ФГБОУ ВО ДВГУПС.

#### **Публикация в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus**

9. **Suprun, D. A.** On characteristic signs of damage of thyristor arms of AC electric locomotive power converter / V.G. Skorik, D.A. Suprun, O.A. Malysheva, E.V. Bunyaeva. – Текст : электронный // AIP Conference Proceedings. – 16 May 2023. – 2476 (1): 020062.

#### **Другие публикации по теме диссертации:**

10. Власьевский, С.В Система определения повреждений в силовом преобразователе электровоза переменного тока в режиме тяги / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, Д.А. Супрун, Е.В. Буняева, А.И. Блажнов. – Текст : непосредственный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – № 5 (45). – С. 71–77.

11. Власьевский, С.В. Математическая модель для исследования электромагнитных процессов при аварийных режимах силового преобразователя электровоза переменного тока / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, **Д.А. Супрун**. – Текст : электронный // В сборнике: Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава. Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; под редакцией И.К. Лакина. – 2020. – С. 184–189.
12. Супрун, Д. А. О функциональном диагностировании тиристорных плеч в силовых преобразователях электровозов переменного тока / Д.А. Супрун. – Текст : электронный // В сборнике: Актуальные вопросы энергетики. Материалы 7-й Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной профессиональному празднику "День энергетика"; ответственный редактор О.А. Пустовая. – 2020. – С. 31–35.
13. Малышева, О.А. Особенности применения диодно-транзисторного разрядного плеча в выпрямительно-инверторном преобразователе электровоза переменного тока / О.А. Малышева, А.И. Блажнов, Е.В. Новикова, **Д.А. Супрун**, В.В. Семченко. – Текст : электронный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 3 (28). – С. 24–30.
14. **Супрун, Д.А.** Принцип адаптации управления многозонным тиристорным выпрямителем электровоза переменного тока в аварийном режиме / Д.А. Супрун, В.Г. Скорик, О.А. Малышева, Е.В. Буняева. – Текст : электронный // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 4. – С. 103–113.
15. **Супрун, Д.А.** Система рабочего диагностирования силовых преобразователей электровозов переменного тока / Д.А. Супрун, В.Г. Скорик. – Текст : электронный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2022. – Т. 2. – С. 51–56.
16. Буняева, Е.В. Автоматизированная система управления и диагностирования выпрямительно-инверторным преобразователем электровозов переменного тока / Е.В. Буняева, А.С. Зубков, **Д.А. Супрун**. – Текст : электронный // В сборнике: Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе. Сборник материалов X Международной научно-практической конференции. – Москва, – 2022. – С. 199–206.
17. Супрун, Д.А. Моделирование работы многозонного тиристорного выпрямителя в аварийных режимах / **Д.А. Супрун**, Т.В. Бажеко, Я.В. Кузнецова, В.Г. Скорик. – Текст : электронный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2023. – Т. 2. – С. 63-68.
18. **Супрун, Д.А.** Обеспечение работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока в режиме тяги / Д.А. Супрун – Текст : электронный // В сборнике: Молодые ученые - Хабаровскому краю. Материалы XXV краевого конкурса молодых ученых. Редколлегия: Ю.С. Марфин (отв. редактор) [и др.]. – Хабаровск, – 2023. – С. 82-87.

**Супрун Демьян Андреевич**

**СИСТЕМА АЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-  
ИНВЕРТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В  
РЕЖИМЕ ТЯГИ**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 23.04.2024 г. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,2. Зак. 86. Тираж 100 экз.

---

Издательство ДВГУПС  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.