На правах рукописи



Сидоров Георгий Сергеевич

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ Н-МОСТОВ В РЕЖИМЕ АВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ЯЧЕЕК

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Нос Олег Викторович,**
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Виноградов Анатолий Брониславович,**
доктор технических наук, доцент**,** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (г. Иваново), кафедра «Электропривода и автоматизации промышленных установок», профессор кафедры;

Каземирова Юлия Константиновна,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет МЭИ» (г. Москва), кафедра «Автоматизированного электропривода», старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск).

Защита диссертации состоится «18» февраля 2027 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073 г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, корпус I, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» декабря 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень проработанности темы исследования

Современные системы автоматизации производственных процессов в большинстве случаев строятся на основе частотно-регулируемых приводов. За последние десятилетия существенно возросла потребность в высокомощных высоковольтных источниках механического движения вращательного принципа действия на базе асинхронных и синхронных электрических машин переменного тока. Такие машины применяются для управления режимами работы особо ответственных исполнительных механизмов в различных отраслях промышленности, среди которых – перекачивающие насосные агрегаты, в том числе подводного исполнения, подключаемые с помощью длинных кабельных линий, компрессорные и вентиляционные установки, горнодобывающие технологические машины, гребные винты танкеров и ледоколов и т. д. Именно необходимость управления такими высокомощными высоковольтными электроприводами переменного тока обусловливает применение высоковольтных преобразователей частоты (ВПЧ), к которым предъявляются особые требования по надежности и работоспособности.

Одним из ключевых требований к ВПЧ является обеспечение их работоспособности в условиях частичного отказа силовых модулей. Согласно статистике, приблизительно 30 % аварийных ситуаций в устройствах силовой электроники данного класса связаны с конденсаторными батареями, 21 % вызваны отказом полупроводниковых приборов, а в совокупности с отказами плат управления, контактов и разъемных соединений более 50 % аварий приходится на силовую ячейку. Следовательно, научно-прикладная задача повышения надежности ВПЧ, достигаемой за счет продолжения стабильной работы при наличии неисправности с поддержанием максимально возможного уровня выходного напряжения инвертора, является актуальной.

Среди наиболее распространённых на практике топологий многоуровневых преобразователей частоты наибольшей адаптируемостью к восстановлению работоспособности и принципиальной возможностью поддержания функционирования при шунтировании аварийных ячеек обладает конфигурация с каскадным включением однофазных инверторов *ML-SCHB (Series connected H-bridge)*. В настоящее время на российском рынке представлены как зарубежные ВПЧ производства компаний «*Siemens*», «*ABB*», «*Toshiba*», «*Nidec*», «*INVT*» и др., так и отечественные образцы данного типа, изготовленные ООО «НПП ИТСПб», АО «Электромаш», ЗАО «ЭРАСИБ», ООО «НПП ЭКРА» и др. Анализ их функциональных возможностей показывает, что большинство изделий оснащены алгоритмами шунтирования поврежденных ячеек с последующим симметрированием выходных фазных напряжений путем отключения равного количества ячеек во всех фазах или при помощи включения резервных модулей. Однако при этом отсутствуют сведения об алгоритмах смещения нейтральной точки и выравнивания фазных напряжений за счет увеличения напряжения звена постоянного тока (ЗПТ), а также о диагностике и законах коммутации полупроводниковых ключей в зависимости от их текущего состояния.

Изучению вопросов построения и разработки систем высоковольтного электропривода большое внимание уделено в работах: Виноградова А. Б, Анучина А. С, Берестова В. М, Харитонова С. А, Шрейнера Р. Т., Дудкина М. М., Крюкова О. В., Гуляева И. В., Томасова В. С., Вдовина В. В., Котина Д. А., Каземировой Ю. К., Иванчина И. И., Вертегела Д. А. и др. Также вопросы повышения надежности многоуровневых преобразователей частоты рассматривались в работах зарубежных авторов: *P. Hammond, J. Rodriguez, P. Lezana* и др. Тем не менее комплексное математическое описание алгоритма смещения нейтральной точки на основе математического аппарата линейной алгебры с интеграцией в систему векторного управления путем модификации матрицы обратного преобразования Э. Кларк, включающее расчет предельных угловых сдвигов для двигательного режима и получение таблиц допустимых комбинаций для произвольного числа уровней, отсутствует. Таким образом, диссертационное исследование, направленное на разработку алгоритмического метода смещения нейтральной точки с использованием модифицированной матрицы Э. Кларк для симметрирования линейных напряжений высоковольтных *ML-SCHB* в аварийных режимах работы без использования избыточных элементов, является актуальным.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование алгоритмических методов повышения отказоустойчивости высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов на базе многоуровневых преобразователей частоты с каскадным включением Н-мостов, обеспечивающих сохранение работоспособности при отказе силовых ячеек за счет смещения нейтральной точки выходных напряжений без использования аппаратного резерва.

Основной **идеей** работы является замена традиционного аппаратного резервирования, требующего применения дополнительных силовых модулей, алгоритмическим способом, заключающимся в принудительном смещении нейтральной точки инвертора с модификацией матрицы обратного преобразования Э. Кларк, что позволяет сохранить симметрию линейных напряжений при произвольной комбинации зашунтированных ячеек.

Задачи исследования:

1. Провести анализ современных топологий и функциональных возможностей высоковольтных преобразователей частоты для особо ответственных применений, а также обосновать выбор силовой схемы с использованием каскадного включения Н-мостов как наиболее перспективной для реализации алгоритмов отказоустойчивого управления.

2. Выполнить сравнительный анализ различных способов шунтирования силовых ячеек, классифицировать типы обводных ключей и способы их расположения, систематизировать аппаратные методы ввода резерва.

3. Разработать математическое описание алгоритма смещения нейтральной точки для многоуровневых инверторов с каскадным включением Н-мостов на основе математического аппарата линейной алгебры и предложить способ интеграции данного закона в систему векторного управления электрической машины переменного тока путем модификации матрицы обратного преобразования Э. Кларк.

4. Осуществить аналитическое исследование всех реализуемых и недопустимых комбинаций рабочих ячеек, а также оценить предельные значения фазовых

сдвигов, гарантирующих работу частотно-регулируемого электропривода в двигательном режиме с положительной активной мощностью.

5. Обосновать выбор закона широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для практической реализации алгоритма смещения нейтрали в каскадных преобразовательных устройствах.

6. Разработать имитационную модель высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в среде «*MATLAB/Simulink*» с учетом особенностей программной реализации алгоритма смещения нейтральной точки, включающую в себя многоуровневый инвертор с динамической реконфигурацией ШИМ, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и систему векторного управления.

7. Провести экспериментальную верификацию синтезированных алгоритмов на специализированном производственном стенде с использованием адаптированной системы векторного управления типа «ЭРАТОН-В» и промышленного асинхронного двигателя.

Объектом исследования являются электротехнический комплекс «многоуровневый преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель» и алгоритмы управления выходными напряжениями многоуровневого автономного инвертора в аварийных и постававарийных режимах работы.

Предметом исследования являются методы обеспечения работоспособности высоковольтных преобразователей частоты с каскадным включением Н-мостов в аварийных режимах работы на основе смещения нейтральной точки и модифицированного координатного преобразования Э. Кларк.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработано математическое описание алгоритма желаемого смещения нейтральной точки для многоуровневых инверторов с каскадным включением Н-мостов на основе математического аппарата линейной алгебры и решения системы нелинейных уравнений высокого порядка. Этот алгоритм позволяет позволяет универсально определять требуемые амплитуды и углы фазных напряжений при произвольном количестве шунтированных силовых ячеек.

2. Предложен новый способ интеграции алгоритма смещения нейтрали в традиционную систему векторного управления путем модификации матрицы обратного преобразования Э. Кларк, не требующий перестройки базовой архитектуры управляющей части системы электропривода.

3. На основании четырехмерного представления трехфазных переменных с помощью кватернионов предложен новый способ реализации желаемого смещения нейтральной точки многоуровневого инвертора с каскадным включением Н-мостов, использующий четыре независимых кинематических параметра вместо девяти направляющих косинусов.

4. Установлены и проанализированы предельные соотношения для угловых сдвигов между фазными напряжениями инвертора и токами статора исполнительного двигателя переменного тока, обеспечивающие работу частотно-регулируемого электропривода в двигательном режиме с положительным коэффициентом мощности в постававарийном режиме работы.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Разработан автоматизированный алгоритм расчета желаемого пространственного положения нейтральной точки автономного инвертора при симметрировании линейных напряжений, базирующийся на решении системы нелинейных уравнений высокого порядка с использованием модифицированной матрицы обратного преобразования Э. Кларк, что расширяет рабочий диапазон применения многоуровневых преобразователей в аварийных режимах работы.

2. Получены аналитические зависимости для определения предельных фазовых сдвигов между выходными напряжениями инвертора и фазными токами статора исполнительного двигателя переменного тока, позволяющие определить границы применимости алгоритма смещения нейтрали в двигательном режиме работы.

3. Экспериментально подтверждена возможность программной реализации алгоритма смещения нейтрали инвертора на базе модифицированной обратной матрицы координатного преобразования Э. Кларк на штатных средствах управления высоковольтных преобразователей частоты типа «ЭРАТОН-В» без доработки управляющей и силовой частей системы электропривода.

4. Сформированы расчетные таблицы допустимых и нереализуемых комбинаций силовых ячеек для 21-уровневого инвертора, которые могут быть непосредственно встроены в подсистемы предварительной и текущей диагностики, а также реконфигурации высоковольтных преобразователей частоты в процессе эксплуатации.

Результаты диссертационного исследования применялись при выполнении опытно-конструкторской работы по договору № 8291-ЦТТ/2024 от 19.03.2024 г. «Разработка конструкторской документации и производство системы управления частотно-регулируемым электроприводом «Siemens».

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Методика определения желаемого смещения нейтральной точки для многоуровневого инвертора с каскадным включением Н-мостов, основанная на решении системы нелинейных уравнений высокого порядка и математическом аппарате линейной алгебры, позволяющая при произвольном количестве зашунтированных ячеек многоуровневого инвертора устанавливать желаемые параметры выходных гармонических напряжений, обеспечивающих симметричное питание электрической машины переменного тока.

2. Способ программной интеграции алгоритма смещения нейтрали в систему векторного управления без изменения ее базовой архитектуры, заключающийся в модификации матрицы обратного координатного преобразования Э. Кларк.

3. Алгоритм желаемого смещения нейтральной точки многоуровневого инвертора на базе Н-мостов, основанный на представлении задающих воздействий в виде четырехмерных гиперкомплексных чисел.

4. Методика расчета предельных угловых сдвигов между выходными напряжениями многоуровневого инвертора и фазными токами статора многофазного двигателя, обеспечивающих работу частотно-регулируемого электропривода с положительным коэффициентом мощности по основной гармонике в аварийном режиме работы.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной постановкой задач и использованием математического аппарата линейной алгебры, методов теории автоматического управления и электропривода; применением верифицированных блоков библиотек «*MATLAB/Simulink*» и собственных программных модулей; совпадением результатов вычислительного эксперимента с теоретическими положениями; качественным и количественным соответствием результатов имитационного моделирования и экспериментальных данных – максимальное расхождение не превышает 5 %; проведением экспериментальных исследований на сертифицированном оборудовании в условиях действующего производства ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск) и многократной повторяемостью результатов.

Методы исследования

Для решения сформулированных выше задач диссертационного исследования использовались базовые положения теории электропривода переменного тока и теории автоматического управления, математический аппарат линейной алгебры, включая различные способы координатных преобразований, методы широтно-импульсной модуляции. Проверка работоспособности синтезированных алгоритмов производилась с помощью имитационного моделирования и натурного эксперимента на промышленном стенде и оборудовании.

Апробация работы

Основные положения работы были представлены в форме докладов на конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии», 2025; Международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника», 2026; X Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения», 2026.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 3 представлены в рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ), по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы, а также получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора в печатных работах, опубликованных в соавторстве с научным руководителем, заключается в разработке математического описания алгоритма смещения нейтральной точки, создании имитационной модели высоковольтного частотно-регулируемого электропривода, проведении вычислительных и имитационных экспериментов, анализе полученных результатов, подготовке экспериментального стенда и выполнении натурных испытаний. Постановка цели и задач диссертационного исследования осуществлялась совместно с научным руководителем О. В. Носом.

Структура и объем диссертации

Диссертация объемом 222 страницы состоит из введения, основной части (4 главы), заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 191 наименования и 7 приложений. Работа содержит 140 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, описаны применяемые методы, а также представлены основные положения, выносимые на защиту, включая сведения о реализации результатов работы и теоретической и практической значимости работы.

В первой главе выполнен анализ современного состояния и тенденций развития ВПЧ. Рассмотрены основные топологии многоуровневых инверторов и на основании сравнительного анализа модульности, ремонтопригодности и принципиальной возможности поддержания работоспособности при частичных отказах силовых элементов обосновано, что топология с каскадным включением *H*-мостов является наиболее перспективной для построения алгоритмов повышения надежности и отказоустойчивости.

Далее был выполнен анализ рынка отечественных и зарубежных ВПЧ, на основании которого было установлено, что большинство серийно выпускаемых преобразователей оснащены лишь базовыми алгоритмами шунтирования поврежденных ячеек (симметричное отключение равного числа ячеек во всех фазах или ввод аппаратного резерва). В открытых источниках на отечественные ВПЧ отсутствуют сведения о промышленной реализации алгоритмов смещения нейтральной точки, позволяющих сохранить симметрию линейных напряжений при произвольной комбинации зашунтированных ячеек без использования избыточных силовых модулей, что подтверждает актуальность и научную новизну диссертационной работы.

В заключительной части выполнена систематизация аппаратных средств шунтирования силовых ячеек по принципу

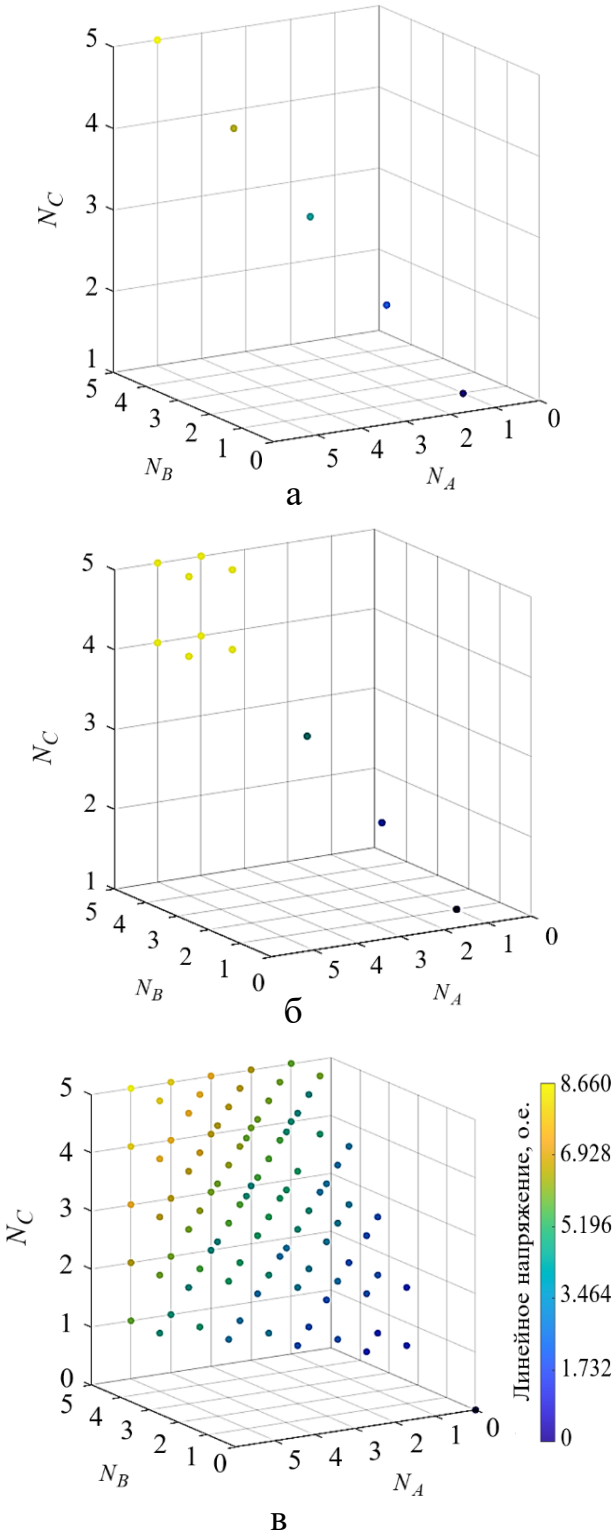


Рисунок 1 – Доступные состояния и напряжения на выходе 11-уровневого инвертора с неуправляемым выпрямителем с применением методов резервирования: а – нагрузочное или байпас равного числа ячеек; б – ввод резерва; в – АСН.

действия (полупроводниковые, механические) и месту установки (внутреннее, внешнее расположение). Сравнительный анализ методов резервирования (рис. 1) показал, что алгоритмический метод смещения нейтрали (АСН) обеспечивает более 100 устойчивых состояний 11-уровневого инвертора, тогда как симметричное байпасирование позволяет реализовать лишь 5 состояний соответственно.

Вторая глава посвящена разработке математического описания алгоритма смещения нейтральной точки для многоуровневых инверторов ML-SCHB. В отличие от известных геометрических подходов, предложенный метод базируется на решении системы нелинейных уравнений высокого порядка с использованием аппарата линейной алгебры. Системы уравнений (1) и (2) позволяют определить требуемые амплитуды и углы фазных напряжений инвертора, обеспечивающие симметрию выходных линейных напряжений при произвольном числе зашунтированных ячеек (рис. 2).

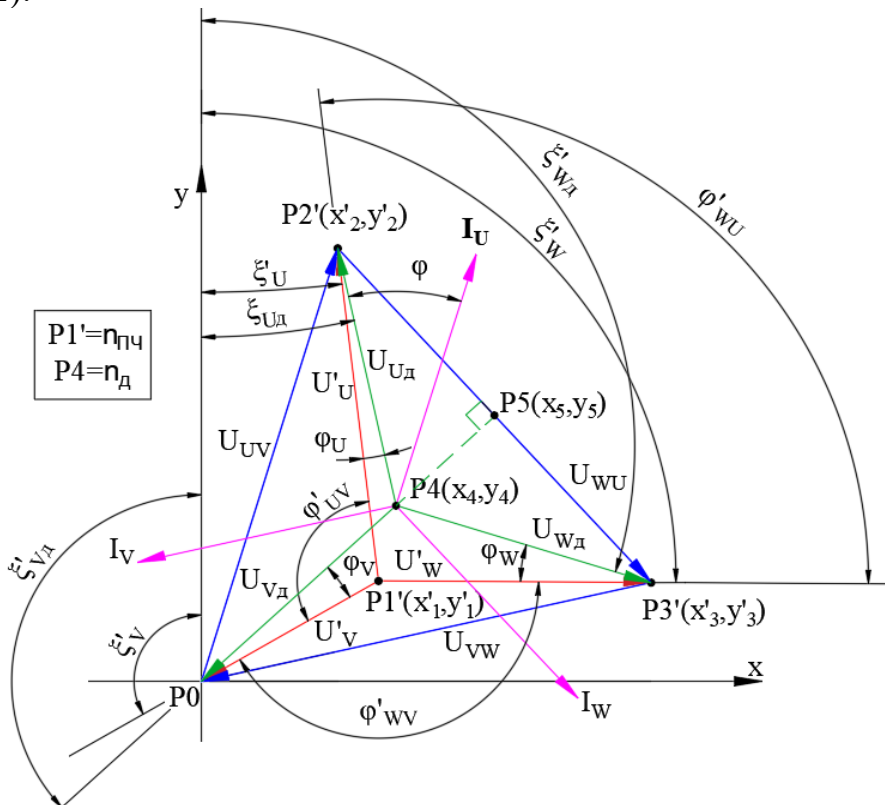


Рисунок 2 – Расположения векторов фазных и линейных напряжений при повреждении инвертора с комбинацией силовых ячеек $N_U = 5$, $N_V = 3$, $N_W = 4$.

$$
\begin{cases}
x_2'^2 + y_2'^2 = x_3'^2 + y_3'^2;\ x_1' = \left|\vec{U}_V'\right|\cos(\frac{\pi}{6});\ \ y_1' = \left|\vec{U}_V'\right|\sin(\frac{\pi}{6});\ \ x_3' > 0; \\
(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2 = \left|\vec{U}_U'\right|^2;\ (x_3' - x_1')^2 + (y_3' - y_1')^2 = \left|\vec{U}_W'\right|^2;\ \frac{x_3' \cdot x_2' + y_3' \cdot y_2'}{x_2'^2 + y_2'^2} = \cos(\frac{\pi}{3}); \\
\cos(\varphi_{UV}') = \dfrac{(x_2' - x_1')\cdot(0 - x_1') + (y_2' - y_1')\cdot(0 - y_1')}{\sqrt{(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2}\cdot\sqrt{(0 - x_1')^2 + (0 - y_1')^2}}; \\
\cos(\varphi_{WU}') = \dfrac{(x_3' - x_1')\cdot(x_2' - x_1') + (y_3' - y_1')\cdot(y_2' - y_1')}{\sqrt{(x_3' - x_1)^2 + (y_3' - y_1)^2}\cdot\sqrt{(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2}}; \\
\varphi_{UV}' = \arccos(cos(\varphi_{UV}'))\ \text{при}\ 0 \le \varphi'_{UV} \le \pi;\ \ \varphi_{WU}' = \arccos(cos(\varphi_{WU}'))\ \text{при}\ 0 \le \varphi'_{WU} \le \pi.
\end{cases}
\tag{1}
$$

$$\begin{cases} x_5 = \dfrac{x'_2 + x'_3}{2};\ y_5 = \dfrac{y'_2 + y'_3}{2};\ k = \dfrac{y_5}{x_5};\ x_4 = \dfrac{\left|\vec{U}'_{VW}\right|}{\sqrt{3(1+k^2)}};\ y_4 = \dfrac{\left|\vec{U}'_{VW}\right| \cdot k}{\sqrt{3(1+k^2)}}; \\ \xi'_U = \operatorname{atan}2(x'_2 - x'_1, y'_2 - y'_1);\ \xi'_V = \dfrac{2\pi}{3};\ \xi'_W = \operatorname{atan}2(x'_3 - x'_1, y'_3 - y'_1); \\ \xi_{U\partial} = \operatorname{atan}2(x'_2 - x_4, y'_2 - y_4);\ \xi_{V\partial} = \operatorname{atan}2(x'_3 - x_4, y'_3 - y_4);\ \xi_{W\partial} = \operatorname{atan}2(0 - x_4, 0 - y_4) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \varphi = \arccos(\cos\varphi)\ при\ \varphi \in [0, \dfrac{\pi}{2}) \cup (\dfrac{3\pi}{2}, 2\pi);\ \xi_{I_U} = \xi_{U\partial} - \varphi;\ \xi_{I_V} = \xi_{V\partial} - \varphi;\ \xi_{I_V} = \xi_{W\partial} - \varphi; \\ \varphi_U = \xi_{U\partial} - \xi'_U;\ \varphi_V = \xi_{V\partial} - \xi'_V;\ \varphi_W = \xi_{W\partial} - \xi'_W;\ \varphi'_U = \xi_{I_U} - \xi'_U;\ \varphi'_V = \xi_{I_V} - \xi'_V;\ \varphi'_W = \xi_{I_W} - \xi'_W. \end{cases} \quad (3)$$

В результате совместного решения систем уравнений (1), (2), (3) для 21-уровневого инвертора получены все комбинации силовых ячеек, при которых принципиально достижима симметрия линейных напряжений (рис. 3 и 4).

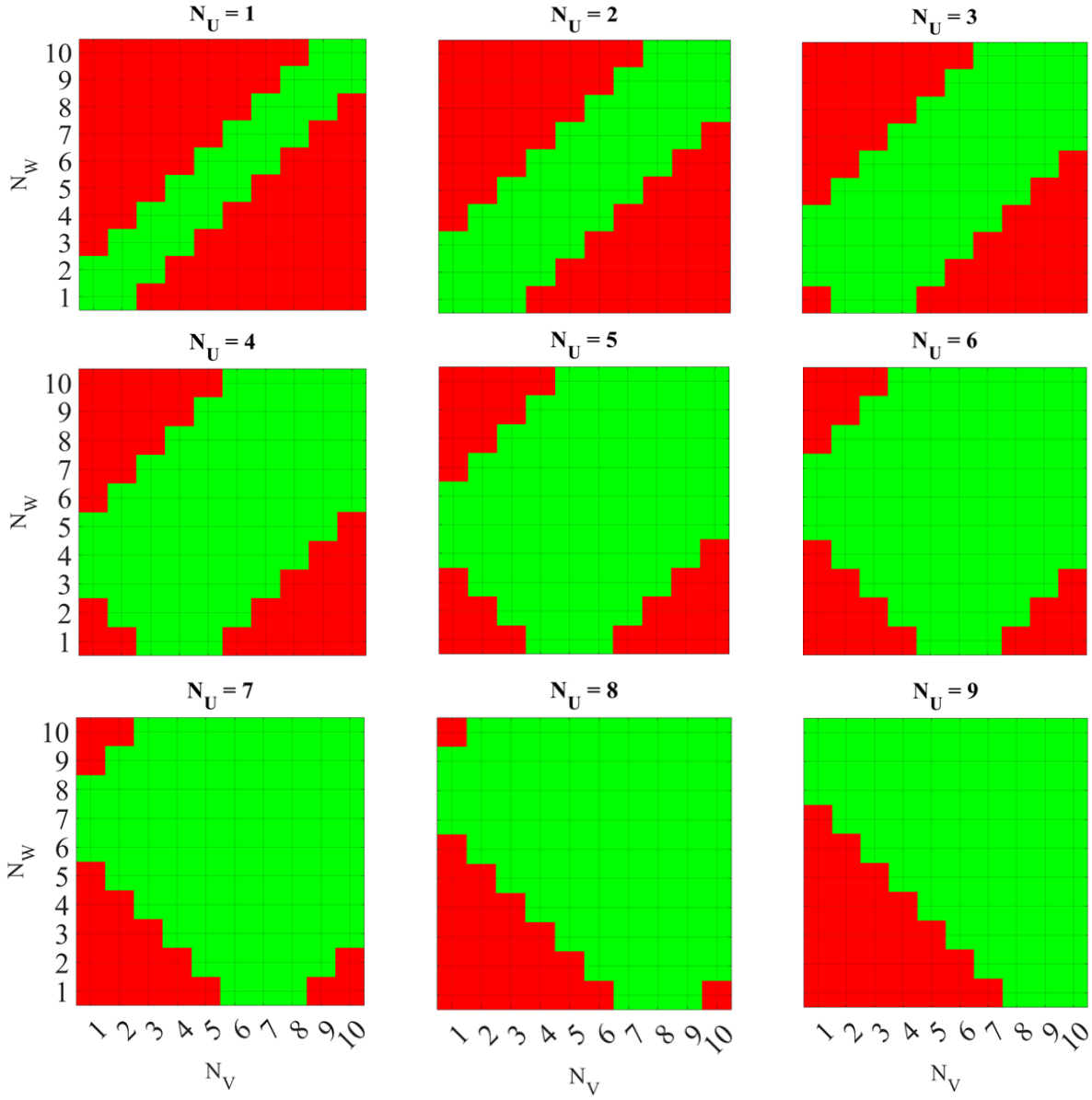


Рисунок 3 – Зоны допустимых и недопустимых комбинаций для обеспечения симметрии линейных напряжений для $N_U = 1...9$

С целью практического построения разработанного закона желаемого смещения нейтральной точки, в диссертации предложен алгоритмический способ интеграции АСН в традиционную систему векторного управления путем модификации матрицы обратного преобразования Э. Кларк (4), что не требует перестройки базовой архитектуры управляющей части и обеспечивает простоту программной реализации.

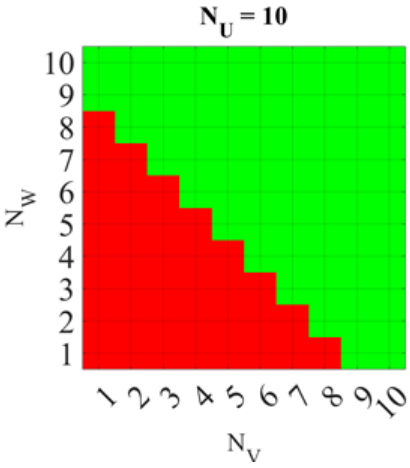


Рисунок 4 – Зоны допустимых и недопустимых комбинаций для обеспечения симметрии линейных напряжений для $N_U = 10$

$$\begin{pmatrix} U_U \\ U_V \\ U_W \end{pmatrix} = \mathbf{L} \times \begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix}, \tag{4}$$

где

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \cos(\varphi'_{UV}) & \sin(\varphi'_{UV}) \\ cos(\varphi'_{WU}) & -\sin(\varphi'_{WU}) \end{pmatrix},$$

где углы φ'_{UV} φ'_{WU} являются функциями от числа работоспособных ячеек N_U, N_V, N_W и определяются из решения нелинейной системы (1-3).

В виду преднамеренного смещения фазных напряжений ($\varphi_U, \varphi_V, \varphi_W$) неизбежно образуется дополнительный фазовый сдвиг между током и напряжением соответствующих фаз. В этой связи для поддержания двигательного режима работы необходимо измерять и управлять коэффициентом мощности нагрузки согласно неравенству (5), что предотвращает переход силовых ячеек в нежелательный режим рекуперации электрической энергии, что иллюстрируют таблицы 1 и 2, в которых приведены результаты численного расчета для случая глубины отказа не более 1 ячейки для 13-уровневого инвертора.

$$\frac{\pi}{2} > \varphi'_{U(V,W)} \geq 0; \;\; 2\pi > \varphi'_{U(V,W)} > \frac{3\pi}{2}. \tag{5}$$

Таблица 1 – Допустимые сочетания рабочих силовых ячеек в фазе для инвертора с 6-ю силовыми модулями в стойке, обеспечивающие симметрию выходных линейных напряжений с глубиной повреждения не более 1 ячейки на фазу.

N_U, шт.	N_V, шт.	N_W, шт.	ξ'_U, °	ξ'_V, °	ξ'_W, °	$\xi_{U\text{д}}$, °	$\xi_{V\text{д}}$, °	$\xi_{W\text{д}}$, °	$U_{\text{лин}}$, о. е.
5	5	5	0	120	–120	0	120	–120	8,66
5	5	6	–106,26	120	6,87	–113,13	126,87	6,87	9,196
5	6	5	6,87	120	–126,87	0	120	–120	9,196
5	6	6	–114,624	120	10,751	–114,624	125,376	5,376	9,784
6	5	5	–126,87	120	–13,74	–126,87	113,13	–6,87	9,196
6	5	6	–5,376	120	–114,624	0	120	–120	9,784
6	6	5	–130,751	120	–5,376	–125,376	114,624	–5,376	9,784
6	6	6	0	120	–120	0	120	–120	10,392

Таблица 2 – Допустимые сочетания рабочих силовых ячеек в стойке для инвертора с 6-ю силовыми модулями в стойке, обеспечивающие симметрию выходных линейных напряжений, с глубиной повреждения не более 1 ячейки на фазу.

N_U, шт.	N_V, шт.	N_W, шт.	φ_U, °	φ_V, °	φ_W, °	φ'_{UV}, °	φ'_{WU}, °	φ'_{VW}, °	$\cos(\varphi_{\min})$
5	5	5	0	0	0	120	120	120	0
5	5	6	–6,87	6,87	0	133,74	113,13	113,13	0,12
5	6	5	–6,87	0	6,87	113,13	133,74	113,13	0,12
5	6	6	0	5,376	–5,376	125,376	125,376	109,249	0,1
6	5	5	0	–6,87	6,87	113,13	113,13	133,74	0,12
6	5	6	5,376	0	–5,376	125,376	109,249	125,376	0,1
6	6	5	5,376	–5,376	0	109,249	125,376	125,376	0,1
6	6	6	0	0	0	120	120	120	0

В данной главе также выполнено обобщение модифицированного преобразования Э. Кларк на многофазные системы с получением условия сходимости решения при смещении нейтральной точки При этом системы уравнений (1-3) должны быть дополнены проверкой реализуемости каждого фазного напряжения согласно неравенству (6), где $\left|\vec{U}'_k\right|$ – модуль фазного напряжения, N_k – количество силовых ячеек в фазе, U_{DC} – напряжение звена постоянного тока силовых ячеек. Пример смещения нейтральной точки инвертора для 6-фазной системы показан на рис. 5.

$$\left|\vec{U}'_k\right| \le N_k \cdot U_{DC} \qquad (6)$$

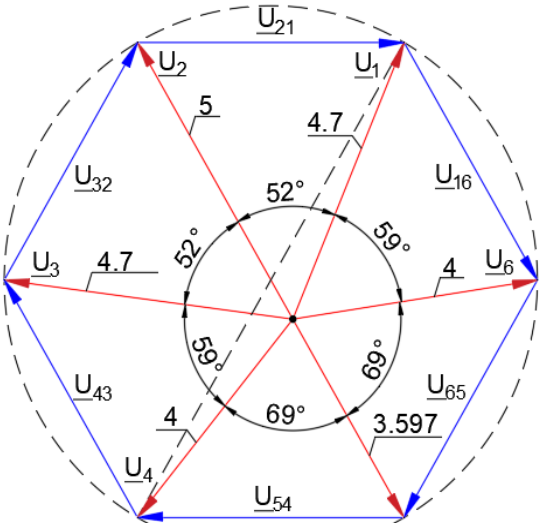


Рисунок 5 – Применение АСН для 6-фазной системы напряжений с повреждением ячеек в нескольких фазах

Для параметризации модифицированного обратного координатного преобразования Э. Кларк предложен математический аппарат четырехмерных гиперкомплексных чисел (кватернионов). Применение кватернионов обусловлено топологической корректностью, связанной с исключением сингулярностей, что гарантирует непрерывность управляющих сигналов при последовательном шунтировании силовых ячеек и исключает скачкообразные изменения задающих сигналов в аварийных режимах. Преобразование координат выполняется согласно формуле (7):

$$\mathbf{X}_{ABC} = \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta0}\mathbf{X}_{\alpha\beta0}\mathbf{\Lambda}^{-1}_{\alpha\beta0} = x_\alpha \mathbf{q_1} + x_\beta \mathbf{q}_2 + x_0 \mathbf{q}_3, \qquad (7)$$

где $\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta0} = \lambda_0 + \lambda_1\mathbf{q}_1 + \lambda_2\mathbf{q}_2 + \lambda_3\mathbf{q}_3$ – кватернион преобразования трехмерной системы координат $\alpha, \beta, 0$ в A , B, C; $\mathbf{X}_{\alpha\beta0} = x_\alpha \mathbf{q_1} + x_\beta \mathbf{q}_2 + x_0 \mathbf{q}_3$, в котором в качестве

вещественных коэффициентов λ_1, λ_2, λ_3 выступают переменных состояния электрической машины x_α, x_β, x_0; $\mathbf{X}_{ABC} = x_A\mathbf{q_1} + x_B\mathbf{q}_2 + x_C\mathbf{q}_3$, где x_A, x_B, x_C – текущие значения трехфазных токов, напряжений, потокосцеплений электрической машины и т. д.; $\mathbf{q}_1$, $\mathbf{q}_2$, $\mathbf{q}_3$ – мнимые единицы.

В результате применения правил произведения для мнимых единиц $\mathbf{q}_1$, $\mathbf{q}_2$, $\mathbf{q}_3$ к (7) могут быть получены соотношения (8), (9), (10) для координатных преобразований Э. Кларк, которые справедливы только для случая ортогонализации и нормирования матрицы $\mathbf{L}$ после применения метода Грама-Шмидта (11), где $\mathbf{e}_1^*$, $\mathbf{e}_2^*$, $\mathbf{e}_3^*$ представляют собой ортогональную систему базисных векторов, образованную из столбцов квадратной матрицы $\mathbf{L}$.

$$x_A = \left\|\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta0}\right\|^{-1}\left((\lambda_0^2+\lambda_1^2-\lambda_2^2-\lambda_3^2)x_\alpha + 2(\lambda_1\lambda_2-\lambda_0\lambda_3)x_\beta + 2(\lambda_1\lambda_3+\lambda_0\lambda_2)x_0\right); \quad (8)$$

$$x_B = \left\|\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta0}\right\|^{-1}\left(2(\lambda_2\lambda_1+\lambda_0\lambda_3)x_\alpha + (\lambda_0^2+\lambda_2^2-\lambda_1^2-\lambda_3^2)x_\beta + 2(\lambda_2\lambda_3+\lambda_0\lambda_1)x_0\right); \quad (9)$$

$$x_C = \left\|\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta0}\right\|^{-1}\left(2(\lambda_3\lambda_1-\lambda_0\lambda_2)x_\alpha + 2(\lambda_3\lambda_2+\lambda_0\lambda_1)x_\beta + (\lambda_0^2+\lambda_3^2-\lambda_1^2-\lambda_2^2)x_0\right). \quad (10)$$

$$\mathbf{L}^* = \begin{pmatrix} \left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-1} a_{11}^* & \left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-1} a_{12}^* & \left\|\mathbf{e}_3^*\right\|^{-1} a_{13}^* \\ \left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-1} a_{21}^* & \left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-1} a_{22}^* & \left\|\mathbf{e}_3^*\right\|^{-1} a_{23}^* \\ \left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-1} a_{31}^* & \left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-1} a_{32}^* & \left\|\mathbf{e}_3^*\right\|^{-1} a_{33}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11}^* & L_{12}^* & L_{13}^* \\ L_{21}^* & L_{22}^* & L_{23}^* \\ L_{31}^* & L_{32}^* & L_{33}^* \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Вследствие нормирования столбцов матрицы $\mathbf{L}$ амплитудные значения трехфазных гармонических сигналов после обратного преобразования Э. Кларк изменяются, по причине чего в прямой канал блока ШИМ необходимо вводить согласующие коэффициенты μ_A, μ_B, μ_C которые представляют собой величины, обратные евклидовым нормам строк матрицы $\mathbf{L}^*$:

$$\mu_A = \frac{1}{\sqrt{(L_{11}^*)^2 + (L_{12}^*)^2 + (L_{13}^*)^2}};$$

$$\mu_B = \frac{1}{\sqrt{(L_{21}^*)^2 + (L_{22}^*)^2 + (L_{23}^*)^2}};$$

$$\mu_C = \frac{1}{\sqrt{(L_{31}^*)^2 + (L_{32}^*)^2 + (L_{33}^*)^2}}.$$

На основе сравнительного анализа различных методов широтно-импульсной модуляции для управления выходом *ML-SCHB* в диссертации был обоснован выбор фазосдвигающей ШИМ для многоуровневых каскадных преобразователей с изме-

няемой конфигурацией силовой части, обеспечивающей равномерное распределение потерь между силовыми ячейками, модульность масштабирования и улучшенный спектральный состав выходного напряжения.

В третьей главе разработана имитационная модель высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в среде «*MATLAB/Simulink*», включающая в себя многоуровневый инвертор с динамической реконфигурацией ШИМ, математическую модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в ортогональных неподвижных осях α, β, систему векторного управления с подчиненным регулированием токов статора, угловой скорости вала и модуля вектора потокосцепления ротора, включая расчет численных значений коэффициентов регулятора для двигателя ВРА180М4БУ2,5.

Ключевой особенностью разработанной модели является возможность изменения фазовых сдвигов опорных генераторов *PS-PWM* в реальном времени при шунтировании аварийных ячеек. Моделирование показало, что сохранение исходных угловых смещений при отказе ячеек приводит к недопустимому росту гармонических искажений и асимметрии фазных токов. Применение разработанного алгоритма пересчета углов и модифицированной матрицы Э. Кларк позволяет сохранить синусоидальную мгновенную форму фазных токов и симметрию линейных напряжений для всех реализуемых комбинаций работоспособных ячеек (рис. 6-9).

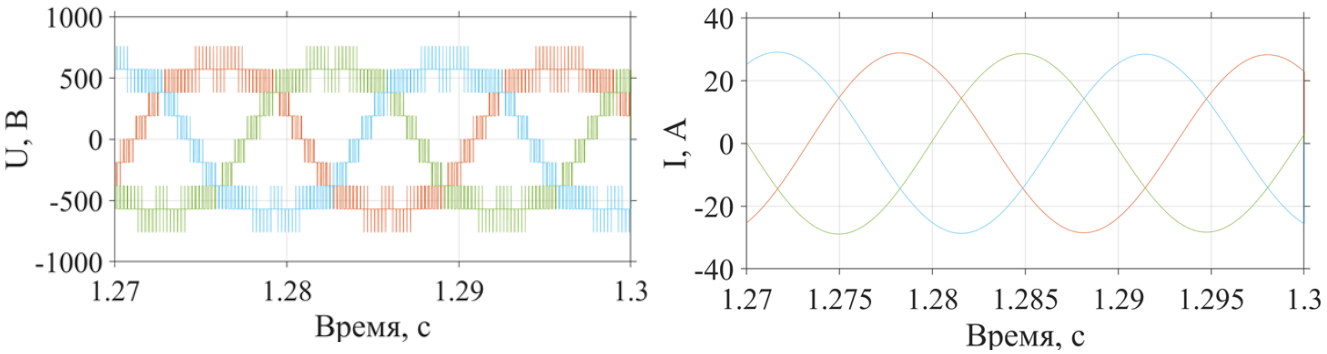


Рисунок 6 – Выходные фазные напряжения и токи инвертора при номинальной нагрузке и частоте питания 50 Гц.

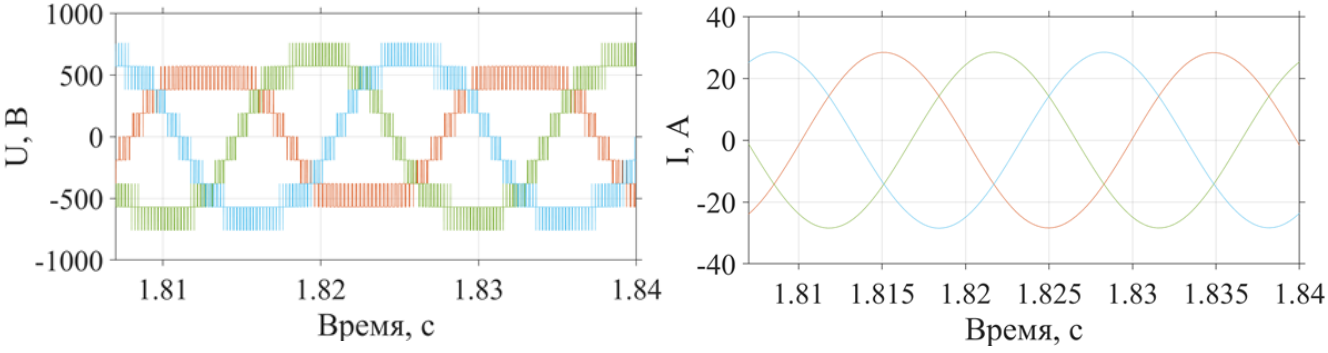


Рисунок 7 – Выходные фазные напряжения и токи инвертора при номинальной нагрузке, частоте 50 Гц и одной шунтированной силовой ячейки в фазе *U*.

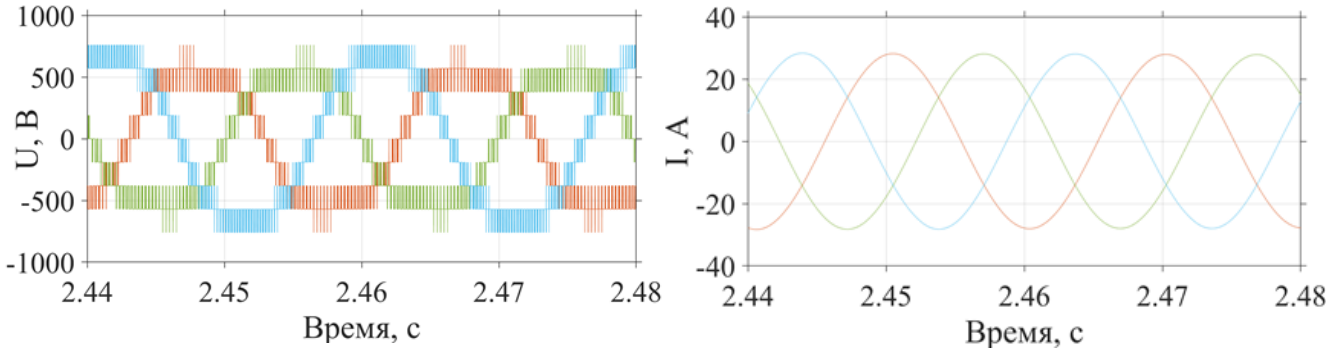


Рисунок 8 – Выходные фазные напряжения и токи при номинальной нагрузке, частоте 50 Гц и двумя шунтированными силовыми ячейками в фазах *U* и *V*.

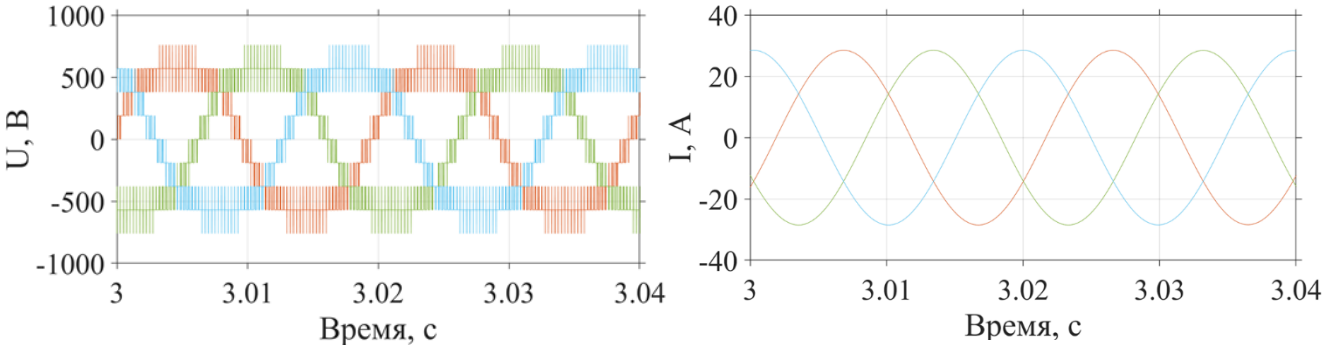


Рисунок 9 – Выходные фазные напряжения и токи при номинальной нагрузке, частоте 50 Гц и тремя шунтированными силовыми ячейками в фазах *U*, *V* и *W*.

Проведено моделирование аварийных режимов при последовательном шунтировании от одной до трех силовых ячеек в различных фазах. Результаты моделирования подтвердили, что разработанный алгоритм обеспечивает стабильную работу электропривода в поставарийных режимах (рис. 10 и 11).

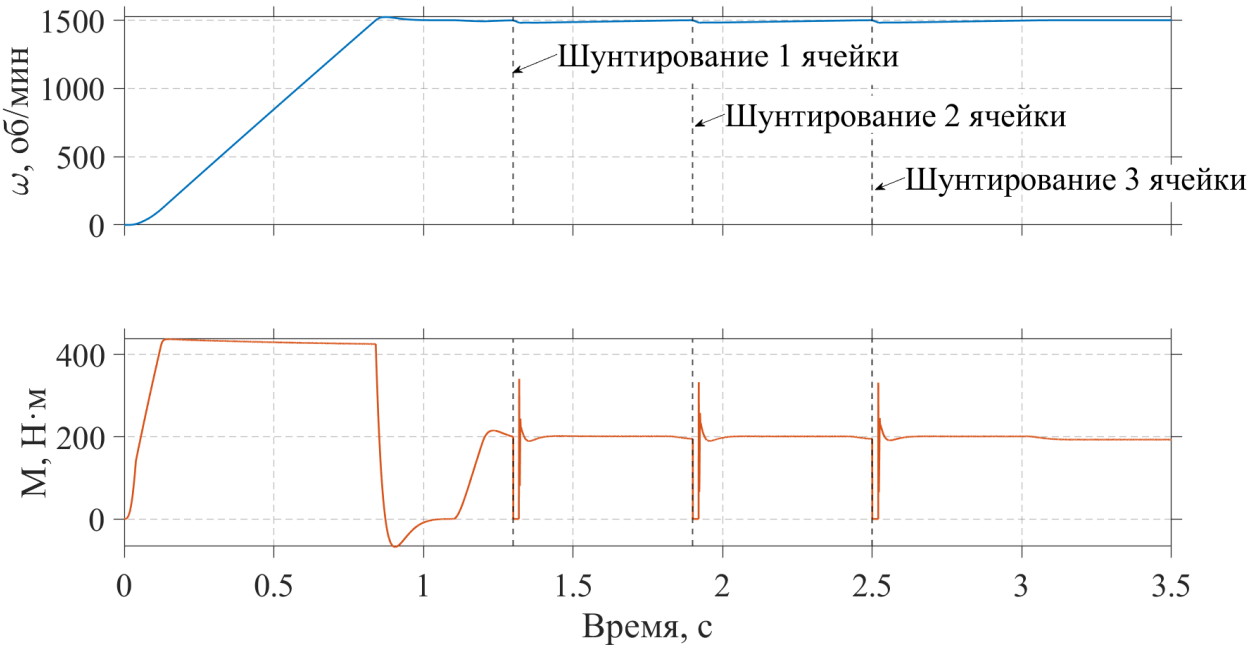


Рисунок 10 – Переходные процессы по скорости и электромагнитному моменту в частотно-регулируемом электроприводе на базе АДКЗР при последовательном шунтировании силовых ячеек

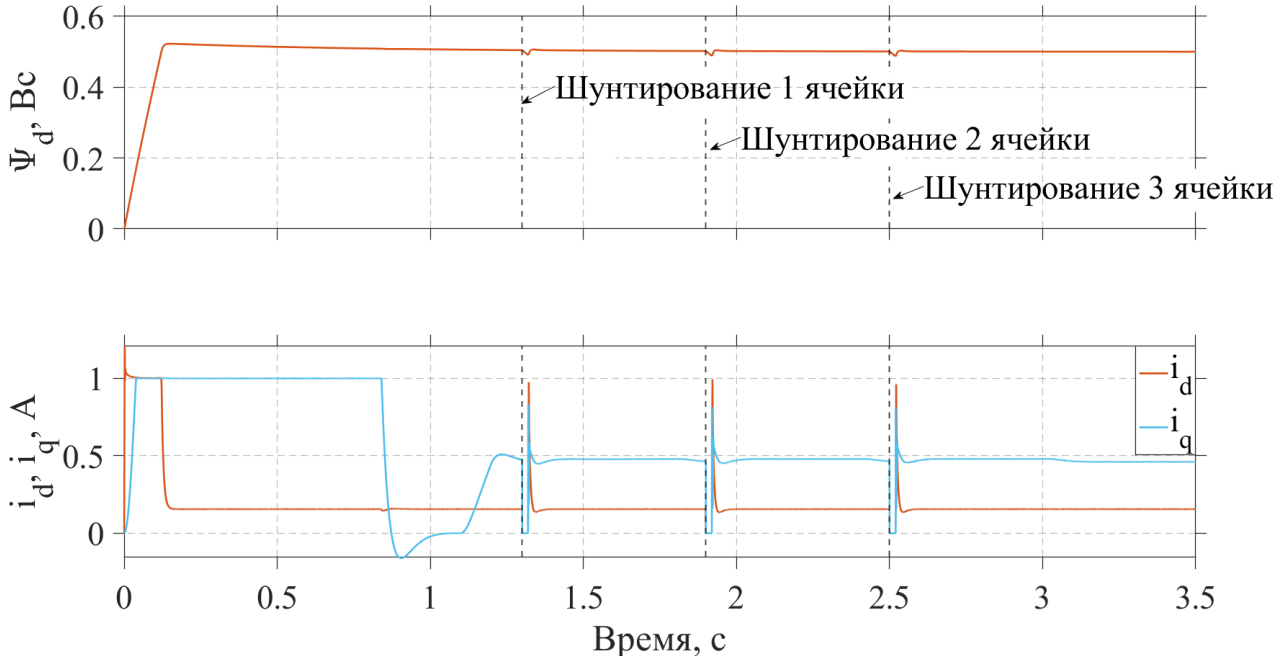


Рисунок 11 – Переходные процессы по потокосцеплению по оси *d* и токам по осям *d* и *q* в частотно-регулируемом электроприводе на базе АДКЗР при последовательном шунтировании силовых ячеек

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной верификации разработанных алгоритмов на производственном стенде ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск) с использованием адаптированной системы управления «ЭРАТОН-В» (рис. 12) и промышленного асинхронного двигателя. В данном разделе также приведено подробное описание экспериментальной установки, состоящей из силового многообмоточного трансформатора, 18-ти силовых ячеек с возможностью шунтирования, систему управления на базе *DSP* и ПЛК, а также нагрузочную машину постоянного тока. Экспериментальные исследования производились для режимов холостого хода и номинальной нагрузки при шунтировании одной, двух и трех силовых ячеек (рис. 13 и 14), которые подтвердили возможность сохранения симметрии линейных напряжений (рис. 15-17) без использования аппаратного резерва за счет дополнительного углового сдвига между фазными напряжениями инвертора. В ходе эксперимента также было установлено, что применение отдельного регулятора коэффициента мощности исключает рекуперацию энергии в звено постоянного тока в двигательном режиме при отказе ячеек.



Рисунок 12 – Блоки силовых ячеек и шкаф управления адаптированной системы “ЭРАТОН-В” в составе экспериментального стенда

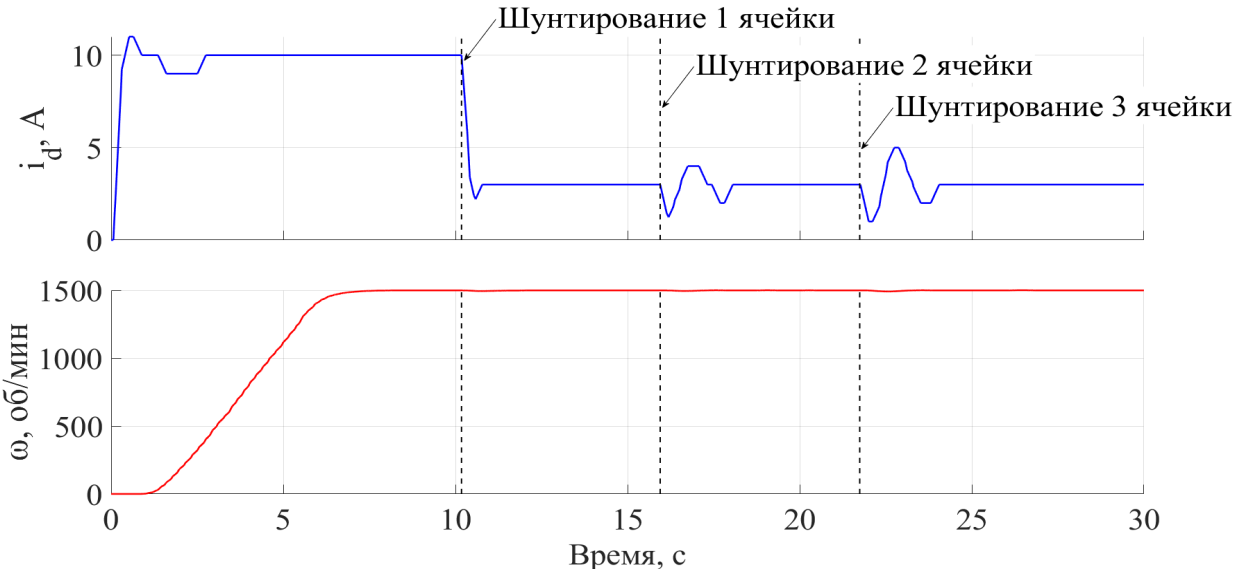


Рисунок 13 – Переходные процессы по скорости и току по оси *d* электропривода при последовательном шунтировании силовых ячеек на холостом ходу

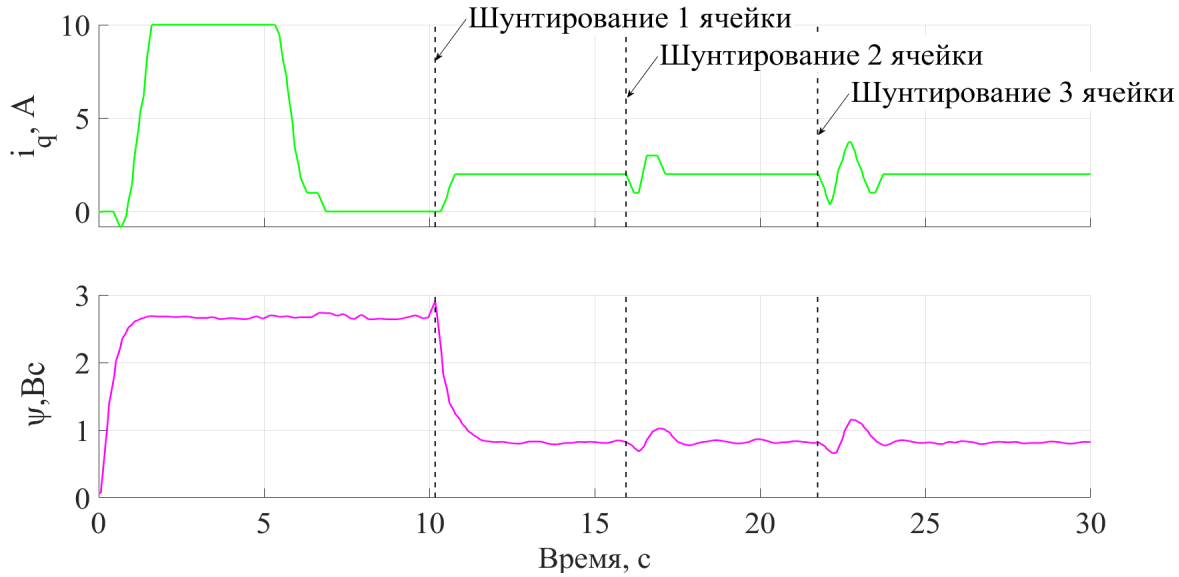


Рисунок 14 – Переходные процессы потокосцеплению по оси *d* и току по оси *q* электропривода при последовательном шунтировании силовых ячеек на холостом ходу

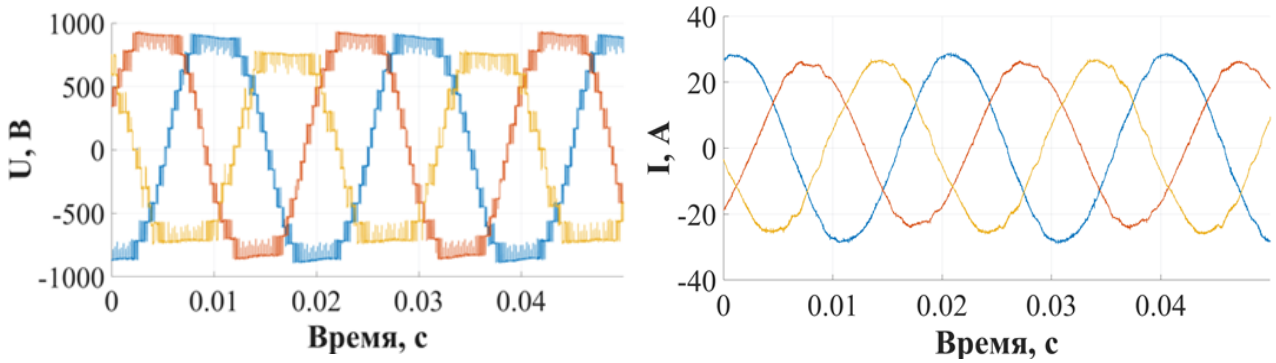


Рисунок 15 – Экспериментальные осциллограммы выходных фазных напряжений и токов инвертора при номинальной нагрузке, частоте 50 Гц и шунтировании одной ячейки в фазе *U*

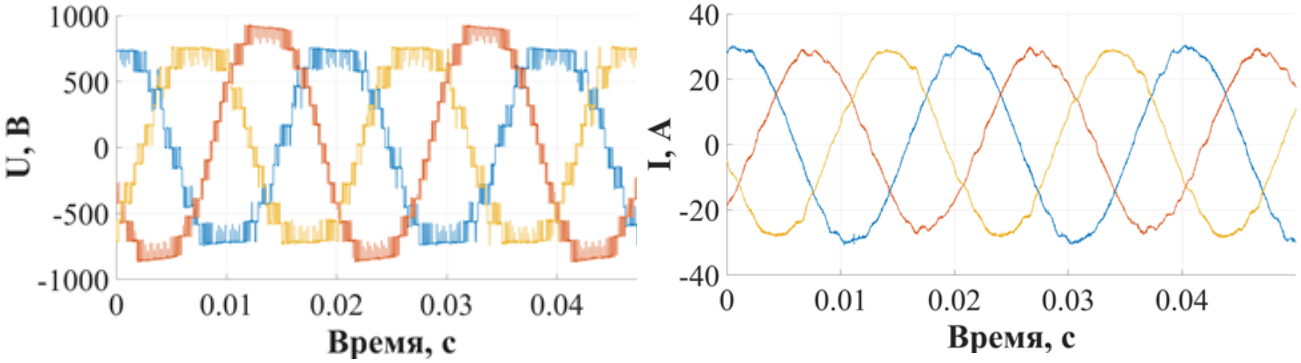


Рисунок 16 – Экспериментальные осциллограммы выходных фазных напряжений и токов при номинальной нагрузке, частоте 50 Гц и одновременном шунтировании двух ячеек в фазах *U* и *V*

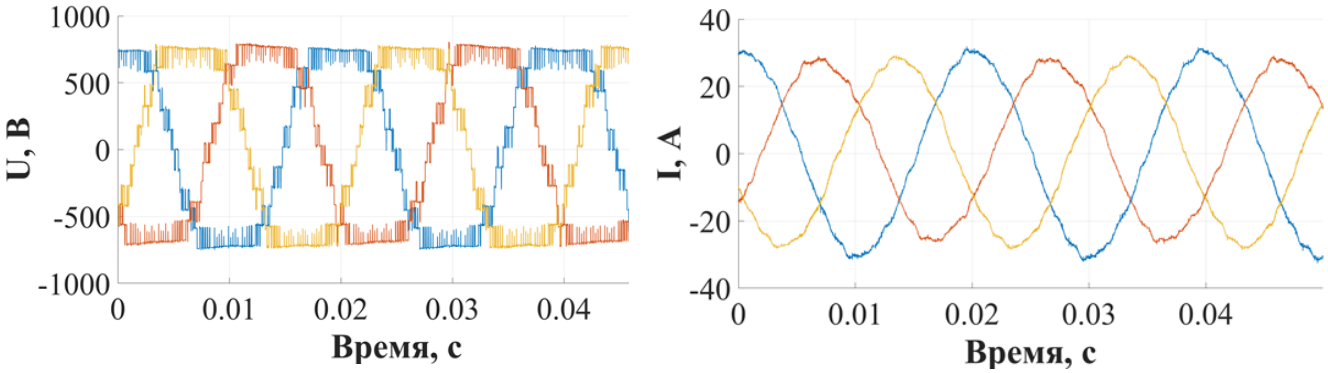


Рисунок 17 – Экспериментальные осциллограммы выходных фазных напряжений и токов при номинальной нагрузке, частоте 50 Гц и одновременном шунтировании трех ячеек в фазах *U*, *V* и *W*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнена разработка и исследование алгоритмических методов повышения отказоустойчивости и работоспособности высоковольтного частотно-регулируемого электропривода на базе многоуровневых преобразователей частоты с каскадным включением Н-мостов, обеспечивающих сохранение работоспособности при отказе силовых ячеек за счет смещения нейтральной точки выходных напряжений. Решена актуальная научно-прикладная задача, имеющая существенное значение для развития систем электропривода особо ответственных механизмов в нефтегазовой, горнодобывающей и транспортной отраслях. В число основных научно-практических результатов, полученных в работе, входит:

1) На основе сравнительного анализа показано, что каскадная структура (*ML-SCHB*) обладает наилучшей модульностью и пригодна для отказоустойчивого управления.

2) Методика численного расчета пространственного смещения нейтральной точки на основе аппарата линейной алгебры и решения системы нелинейных уравнений, позволяющее универсально определять требуемые амплитуды и углы фазных напряжений при произвольном числе зашунтированных ячеек. Предложен

способ интеграции алгоритма в систему векторного управления путем модификации матрицы обратного преобразования Э. Кларк, не требующий перестройки базовой архитектуры системы управления

3) На основе кватернионного представления трехфазных переменных предложен новый способ реализации желаемого смещения нейтральной точки многоуровневого инвертора с каскадным включением Н-мостов: задающие воздействия описываются четырехмерными гиперкомплексными числами, что позволяет перейти от девяти направляющих косинусов к четырем независимым кинематическим параметрам.

4) Вычислительным экспериментом для 21-уровневого инвертора полученные таблицы допустимых комбинаций, которые могут быть использованы при проектировании систем диагностики и реконфигурации ВПЧ.

5) Выявлен и проанализирован эффект влияния алгоритма смещения нейтрали на электротехнический комплекс “силовой преобразователь – двигатель”, который показал, что смещение нейтральной точки приводит к дополнительному фазовому сдвигу между фазными напряжениями и токами двигателя. Разработана методика расчета предельных значений данного сдвига, гарантирующая работу электромеханической системы в двигательном режиме с положительным коэффициентом мощности и исключающая рекуперацию энергии в звено постоянного тока силовой ячейки.

6) На производственном стенде ЗАО «ЭРАСИБ» с использованием адаптированной системы векторного управления «ЭРАТОН-В» экспериментально подтверждена работоспособность алгоритма при шунтировании от одной до трех силовых ячеек. Во всех исследованных конфигурациях обеспечена гармоническая форма фазных токов и симметрия линейных напряжений. Расхождение между результатами моделирования и экспериментом не превышает 5 %.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что разработанная математическая модель расширяет теоретический аппарат управления многоуровневыми преобразователями в аварийных режимах; предложенный метод позволяет повысить отказоустойчивость без введения избыточных силовых ячеек, что для конфигурации с шестью ячейками в фазе дает экономию до 30 % стоимости силовой части; разработанная имитационная модель может использоваться при проектировании и модернизации электроприводов; результаты внедрены в систему управления «ЭРАТОН-В» ЗАО «ЭРАСИБ» и используются на объектах ООО «НТЦ». Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, использованием апробированного математического аппарата и многократной повторяемостью экспериментальных данных на сертифицированном оборудовании.

Таким образом, поставленные задачи полностью решены: разработаны теоретические основы, выполнено имитационное моделирование и проведена экспериментальная проверка алгоритма смещения нейтральной точки, позволяющего сохранять работоспособность высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов при отказе силовых ячеек без использования аппаратного резерва.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Сравнительный анализ методов резервирования в высоковольтных многоуровневых преобразователях частоты на базе каскадного включения Н-мостов / О. В. Нос, Г. С. Сидоров. – DOI 10.32603/2071-8985-2026-19-5-81-94 // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2026. – Т. 19, № 5. – С. 81–94.

2. Алгоритм управления многоуровневым инвертором с каскадным включением Н-мостов в аварийном режиме работы с использованием кватернионов / Г. С. Сидоров. – DOI 10.17212/1727-2769-2026-1-31-47 // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2026. – № 1. – С. 31–47.

3. Управляемое смещение нейтральной точки каскадного высоковольтного преобразователя частоты: алгоритм, моделирование и экспериментальная верификация / Г. С. Сидоров, О. В. Нос. – DOI 10.18799.24131830.2026.6.5707 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2026. – Т. 337, № 6. – С. 188–202.

Труды конференций:

4. Управление многоуровневыми преобразователями частоты на базе каскадного включения h-мостов в аварийных режимах работы высоковольтного электропривода / Г. С. Сидоров. // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2025) : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Кемерово, 22–24 окт. 2025 г. – Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева, 2025. – С. 483-487.

5. Решение задачи симметрирования линейных напряжений для каскадных инверторов в аварийном режиме работы / Г. С. Сидоров. – DOI 10.26160/2541-8637-2026-17-238-245 // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2026. – № 17. – С. 238–245.

6. Применение алгебры кватернионов для симметрирования линейных напряжений каскадного многоуровневого инвертора в аварийных режимах работы / Г. С. Сидоров // Булатовские чтения : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (31 марта 2026 г.). – Краснодар, 2026. – Т. 4. – С. 90–99.

Свидетельство на программу для ЭВМ:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614056 Российская Федерация. Программа вычисления элементов матрицы координатных преобразований трехфазной системы напряжений из ортогональных составляющих для различных комбинаций неисправных силовых ячеек многоуровневого инвертора : заявл. 12.02.2026 : опубл. 12.02.2026 / Г. С. Сидоров, О. В. Нос; Новосиб. гос. техн. ун-т. // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем : офиц. бюл. Федер. службы по интеллектуал. собственности (Роспатент). № 2. – 2026.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57.
Формат 60х84 1/16. Объем 1,1 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ Р-05964. Подписано в печать 16.11.2026 г.