

На правах рукописи



Коровин Александр Владимирович

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ АВТОНОМНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С УПРАВЛЕНИЕМ  
КВАТЕРНИОНОМ НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидат технических наук

Новосибирск – 2022

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

Научный руководитель: **Нос Олег Викторович**  
доктор технических наук, доцент, кафедра Проектирования технологических машин, профессор кафедры.

Официальные оппоненты: **Давидов Альберт Оганезович**,  
доктор технических наук, доцент, Общество с ограниченной ответственностью «Экспериментальная мастерская НаукаСофт» (г. Москва), научно-исследовательский отдел, начальник отдела;

**Пудкова Тамара Валерьевна**,  
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург), кафедра Общей электротехники, ассистент кафедры.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет» (г. Севастополь).

Защита диссертации состоится «15» сентября 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.173.04

канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время одним из важных направлений развития как отечественного, так и зарубежного энергетического комплекса является переход к распределенным системам генерации (РСГ) электрической энергии низкого класса напряжения на основе возобновляемых источников, в качестве которых выступают солнечные батареи, ветрогенерирующие установки, гидроагрегаты на основе периодических колебаний уровня моря вследствие приливов и отливов и т. д. В зависимости от конкретных задач электропитания и типа нагрузок, данные системы переменного тока могут дополняться традиционными источниками на основе газотурбинных или дизельных установок, функционируя в автономном режиме в качестве силового источника напряжения или встраиваться в централизованную систему энергоснабжения в виде отдельного источника тока, причем в последнем случае также предусмотрена возможность генерации электрической энергии для локальных потребителей.

В наиболее общем виде обобщенная структура РСГ включает в себя полностью управляемый силовой инвертор; индуктивно-емкостной LC/LCL-фильтр для уменьшения амплитуды пульсационной составляющей в гармоническом составе генерируемого напряжения вследствие разрывного или ШИМ управления полупроводниковыми ключами; аккумулирующие устройства, в число которых входят свинцово-кислотные или литий-ионные аккумуляторы, суперконденсаторы, кинетические или гравитационные накопители и т. д.; возобновляемые/традиционные источники энергии постоянного или переменного тока, а также нагрузку произвольного вида, в том числе с нелинейными характеристиками, такую как, например, неуправляемые однофазные выпрямители или преобразователи частоты в составе регулируемого электропривода на базе синхронной или асинхронной электрической машины.

В практических приложениях для обеспечения гарантированного качества генерируемой электрической энергии, управляющие воздействия на автономный инвертор напряжения (АИН) формируются в рамках фундаментальных принципов последовательной коррекции, управления по отклонению и подчиненного регулирования путем организации внутреннего быстродействующего контура регулирования токов инвертора и внешнего по отношению к нему контура регулирования напряжений на выходе силового LC-фильтра. В качестве последовательных корректирующих устройств в РСГ применяются традиционные линейные пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференцирующий, пропорционально-резонансный и пропорционально-интегрально-резонансный регуляторы в неподвижной или вращающейся системе координат с компенсацией перекрестных связей между каналами объекта. Помимо этого, аналитическая процедура синтеза может базироваться на релейном, адаптивном, робастном, прогнозирующим и интеллектуальным управлениям.

Как показывает практический опыт эксплуатации данного рода трехфазных систем переменного тока, описанные выше алгоритмы не

обеспечивают желаемые динамические характеристики в режимах отработки внешних скачкообразных возмущающих воздействий и требуемую статическую ошибку в условиях действия интервальной неопределенности параметров, а также требуют наличия высокопроизводительных микропроцессорных программно-аппаратных средств в силу необходимости выполнения большого количества математических операций.

**Степень разработанности темы исследования.** Для исключения указанных выше недостатков диссертационная работа посвящена синтезу законов управления РСГ в рамках математического аппарата некоммутативной ассоциативной алгебры четырехмерных гиперкомплексных чисел (кватернионов). Благодаря новому подходу к построению и организации управляющего устройства, основанному на декомпозиции кватерниона трехфазных напряжений на постоянную и мультигармоническую скалярную составляющие и трехмерную векторную часть, достигается требование бесперебойного электропитания потребителей произвольного вида с нормированным качеством и высоким быстродействием. При этом, благодаря отсутствию каких-либо ограничений на конфигурацию, количество фаз и конкретный вид промышленных или коммунально-бытовых электроприемников в РСГ обеспечивается автоматическая автоподстройка к изменяющимся режимам работы трехфазной системы переменного тока.

**Целью диссертационной работы** является разработка на основе гиперкомплексного представления трехфазных переменных алгоритмов управления автономной системой электропитания, обеспечивающей нормированное качество генерируемой электрической энергии переменного тока в совокупности с высоким быстродействием.

Для достижения сформулированной цели требуется решение следующих **задач:**

1. Выполнить анализ текущего состояния в области способов управления, структурной организации и технической реализации трехфазных систем электропитания с возобновляемыми источниками электрической энергии.

2. Разработать базовые алгоритмические принципы построения трехфазных четырехпроводных систем генерации электрической энергии с использованием математического аппарата алгебры кватернионов, функционирующих в автономном режиме и при подключении к централизованной распределительной сети.

3. Произвести аналитическое исследование специального кватерниона произведения, содержащего в себе полную информацию обо всех мгновенных отклонениях между текущими и эталонными значениями трехфазных напряжений нагрузки.

4. Выполнить структурно-параметрический синтез алгоритмов управления силовым полупроводниковым преобразовательным устройством генерации электрической энергии переменного тока.

#### **Методы исследования**

Поставленные задачи решаются на основании четырехмерной некоммутативной ассоциативной алгебры кватернионов, теории линейных и нелинейных электрических цепей, методов анализа и синтеза систем

автоматического управления (САУ), математического моделирования и экспериментальных исследований.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующем:

1. Определены расчетные соотношения для практической реализации преобразований E. Clarke и R. H. Park в четырёхмерном гиперкомплексном пространстве  $\mathbb{H}$ , образованном одной вещественной и тремя мнимыми единицами, позволяющие выполнять координатные переходы как в общем виде, так и при соблюдении дополнительного требования инвариантности скалярной части кватерниона.

2. Разработан новый теоретический метод выделения из мультигармонического состава трехфазных напряжений произвольной мгновенной формы симметричной гармонической составляющей прямой последовательности фаз на основной частоте, который основывается на декомпозиции специального кватерниона произведения на скалярную вещественную и трехмерную мнимую части.

3. Синтезированы алгоритмы управления силовым полупроводниковым преобразователем в составе РСГ с включением в традиционную структуру дополнительного канала, позволяющего сформировать на нагрузке произвольного вида систему трехфазных напряжений, изменяющихся во времени в соответствии с симметричным гармоническим законом.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. В рамках единого математического аппарата алгебры кватернионов разработана новая концепция построения и организации РСГ, в рамках которой достигается требование бесперебойного электропитания автономных объектов с нормированным качеством и высоким быстродействием.

2. Получены аналитические зависимости для определения специального кватерниона произведения в наиболее общем случае, для численного расчета гармонической прямой последовательности фаз генерируемых напряжений и отклонений от нее как по амплитуде, так и по угловому сдвигу.

3. Разработана инженерная методика синтеза алгоритмов управления быстродействующей системой электропитания автономных объектов с нулевым проводом, функционирующей в условиях действия резкопеременных внешних возмущающих факторов со стороны нагрузки.

4. При создании экспериментальной установки был предложен комплекс оригинальных технических решений, в рамках которых совмещены преимущества кватернионного подхода к управлению РСГ с традиционными методами синтеза, используемыми в преобразовательных устройствах силовой электроники.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмические принципы управления и структурная концепция построения высококачественных быстродействующих трехфазных систем электропитания потребителей произвольного вида в терминах некоммутативной ассоциативной алгебры кватернионов в автономной конфигурации и при подключении к централизованной распределительной сети.

2. Обобщенные координатные преобразования исходного кватерниона трехфазных переменных, в том числе при соблюдении дополнительного требования инвариантности скалярных частей гиперкомплексного числа.

3. Аналитический метод декомпозиции кватерниона трехфазных напряжений на скалярную (действительную) и векторную (мнимую) части, позволяющий выделить из его состава симметричную синусоидальную составляющую прямой последовательности фаз по основной гармонике, а также все компоненты, вызванные амплитудно-фазовой асимметрией и нелинейностью процесса энергопотребления.

4. Инженерная методика структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления силовым преобразовательным устройством в составе РСГ, базирующаяся на предварительном расчете специального кватерниона произведения, который, содержит в себе полную информацию обо всех мгновенных отклонениях между желаемыми и текущими значениями трехфазных напряжений.

**Достоверность** полученных теоретических и научно-прикладных результатов подтверждается корректной постановкой задач, адекватностью математического аппарата некоммутативной ассоциативной алгебры кватернионов, цифровым моделированием различных режимов работы РСГ и экспериментальной верификацией результатов структурно-параметрического синтеза двухконтурной системы подчиненного регулирования трёхфазных напряжений с отдельным управлением составляющей прямой последовательности фаз по основной гармонике и всеми остальными несимметричными и мультигармоническими компонентам.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты, полученные в диссертационной работе, использованы при проектировании автономных систем энергоснабжения в ООО «Энергозапас», г. Новосибирск, при разработке цифровой системы управления электрогенерирующем модулем в ПАО «НПО Алмаз», г. Москва, а также в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

**Апробация работы.** Основное содержание работы и ее отдельные положения докладывались и обсуждались на Международных конференциях молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM) в 2013–2014 г.г. (Алтай, Эрлагол), XIII международной (XIX Всероссийской) конференции по Автоматизированному электроприводу в 2014 г. (г. Саранск), XI международной (XXII Всероссийской) конференции по Автоматизированному электроприводу в 2020 г., (г. Санкт-Петербург), а также на научных семинарах кафедры Электроники и электротехники НГТУ.

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 8 печатных работ, из них 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ, а также 4 статьи в изданиях индексируемых базами данных Scopus/WoS.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 104 используемых источников и одного приложения. Работа изложена на 121 страницах машинного текста, иллюстрируется 46 рисунками и пятью таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлен краткий обзор наиболее распространенных в практических приложениях составных частей распределенных систем генерации электрической энергии переменного тока, включая законы управления системой электропитания в автономной конфигурации, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи прикладного исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** состоит из пяти разделов, первый из которых связан с анализом различных вариантов построения и технической реализации силовой схемы полупроводникового мостового АИН, а также временными законами широтной импульсной модуляции, подразделяющимися на скалярную, векторную, селективную и т. д. Как отмечено в данной части работы, топология инвертора с четвертой стойкой обладает рядом преимуществ по отношению к схемной конфигурации со средней точкой звена постоянного тока в бестрансформаторном исполнении РСГ.

Последующий материал первой главы посвящен расчету выходных LC/LCL-фильтров, обеспечивающих требуемое качество электропитания нагрузок произвольного вида, возобновляемым источникам энергии, к числу которых относят солнечное излучение, сила ветра, морские приливы и т. д., а также различного рода накопителям, необходимость включения которых в состав РСГ вызвана непостоянством и случайным характером периодов генерации и потребления электроэнергии, зависящих, например, от времени суток.

**Во второй главе** диссертации описана векторно-матричная математическая модель трехфазной четырехпроводной системы с АИН в пространстве состояний, изображенная на рисунке 1. На основании общепринятых допущений и законов Кирхгофа, система дифференциальных уравнений РСГ имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L_f \frac{d\mathbf{i}_{UWV}}{dt} = u_{dc} \mathbf{S}_{UWV} - R_f \mathbf{i}_{UWV} - \mathbf{u}_{ABC} + L_N \frac{d\mathbf{i}_N}{dt} + R_N \mathbf{i}_N, \\ C_f \frac{d\mathbf{u}_{ABC}}{dt} = \mathbf{i}_{UWV} - \mathbf{i}_{ABC}, \end{cases} \quad (1)$$
$$i_N = - \sum_{j=U,V,W} i_j,$$

где  $R_f, L_f, C_f$  – активное сопротивление, индуктивность и емкость силового LC-фильтра соответственно;  $R_N, L_N$  – активное сопротивление и индуктивность дросселя, ограничивающего пульсационную составляющую тока между средней точкой четвертой стойкой и трехфазной нагрузкой;  $\mathbf{u}_{ABC}$  – алгебраический вектор-столбец генерируемого напряжения

$$\mathbf{u}_{ABC} = [u_A \quad u_B \quad u_C]^T,$$

$\mathbf{i}_{UVW}, \mathbf{i}_{ABC}, \mathbf{i}_N$  – алгебраические векторы-столбцы токов инвертора, нагрузки и нейтрали соответственно

$$\mathbf{i}_{UVW} = [i_U \quad i_V \quad i_W]^T, \quad \mathbf{i}_{ABC} = [i_A \quad i_B \quad i_C]^T, \quad \mathbf{i}_N = [i_N \quad i_N \quad i_N]^T;$$

здесь T – символ матричного транспонирования;

$\mathbf{S}_{UVW} = [s_U - s_N \quad s_V - s_N \quad s_W - s_N]^T$  – алгебраический вектор-столбец переключающих функций инвертора с четвертой стойкой  $s_U, s_V, s_W, s_N$ , принимающих значение 1 при включении и 0 при закрытии силового ключа, т. е. данная топология имеет 16 разрешенных комбинаций выходного напряжения.

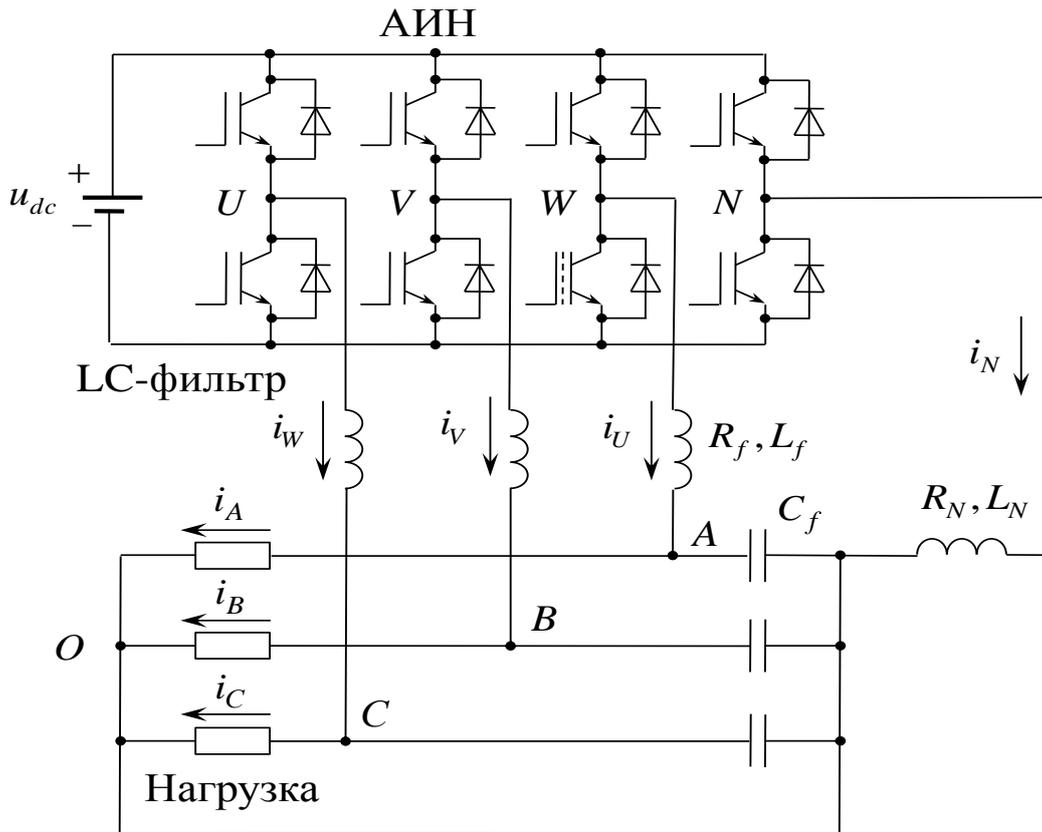


Рисунок 1 – Упрощенная функциональная схема автономной системы электропитания с силовым LC-фильтром и нулевым проводом

После выполнения последовательно реализуемых преобразований Е. Clarke и Р. Н. Park, дифференциальные уравнения (1) в координатах состояния  $d, q, o$  примут следующий вид

$$\begin{cases} u_{dc} \mathbf{S}_{dqo} - \mathbf{u}_{dqo} = \mathbf{L}_{dqo} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_{Idqo} + \omega_u \mathbf{L}_{dqo} \mathbf{D} \mathbf{i}_{Idqo} + \mathbf{R}_{dqo} \mathbf{i}_{Idqo}, \\ C_f \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{dqo} - \omega_u C_f \mathbf{D} \mathbf{u}_{dqo} = \mathbf{i}_{Idqo} - \mathbf{i}_{dqo}, \end{cases}$$

где  $\mathbf{u}_{dqo}, \mathbf{i}_{Idqo}, \mathbf{i}_{dqo}$  – алгебраические векторы напряжения, а также токов инвертора и трехфазной нагрузки вида

$$\mathbf{x}_{dqo} = [x_d \quad x_q \quad x_o]^T;$$

$\mathbf{R}_{dqo}, \mathbf{L}_{dqo}$  – диагональные матрицы активных сопротивлений и индуктивностей дросселей в четырехпроводной силовой цепи РСГ соответственно

$$\mathbf{R}_{dqo} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f + 3R_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{dqo} = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f + 3L_N \end{bmatrix};$$

$\omega_u = \dot{\gamma}_u$  – угловая скорость вращения двумерного подпространства  $d, q$  относительно третьей оси  $o$ ;  $\mathbf{D}$  – вырожденная кососимметрическая матрица поворота вектора на плоскости  $\alpha, \beta$  трехмерного пространства в положительном направлении на электрический угол  $\pi/2$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к качеству генерируемой электрической энергии и быстродействию в режимах отработки скачкообразных изменений со стороны нагрузки, в данной части диссертации также выполнен обзор различного рода временных законов генерации, синтез которых выполняется в классе непрерывных и дискретных САУ в линейной или нелинейной области.

**Третья глава** посвящена анализу и синтезу трехфазных систем электропитания в автономной конфигурации и при подключении к централизованной распределительной сети с использованием четырехмерного гиперкомплексного пространства  $\mathbf{H}$ . Расширение функции комплексной переменной привело к появлению в 1843 г. математического аппарата алгебры кватернионов, которые представляющих собой сумму скалярной (вещественной)  $\text{scal}\mathbf{\Lambda} = \lambda_0 \circ 1$  и векторной (мнимой)  $\text{vect}\mathbf{\Lambda} = \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3$  составляющих

$$\mathbf{\Lambda} = \text{scal}\mathbf{\Lambda} + \text{vect}\mathbf{\Lambda} = \lambda_0 \circ 1 + \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3,$$

здесь  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – действительные коэффициенты;  $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$  – мнимые единицы, связанные между собой на основании некоммутативных правил произведения

$$\mathbf{q}_2 \circ \mathbf{q}_3 = -\mathbf{q}_3 \circ \mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_1, \quad \mathbf{q}_3 \circ \mathbf{q}_1 = -\mathbf{q}_1 \circ \mathbf{q}_3 = \mathbf{q}_2, \quad \mathbf{q}_1 \circ \mathbf{q}_2 = -\mathbf{q}_2 \circ \mathbf{q}_1 = \mathbf{q}_3, \quad (2)$$

$$\mathbf{q}_1^2 = \mathbf{q}_2^2 = \mathbf{q}_3^2 = \mathbf{q}_1 \circ \mathbf{q}_2 \circ \mathbf{q}_3 = -1.$$

Алгебра кватернионов относится к алгебре с делением, в которой применяется обратный кватернион

$$\mathbf{\Lambda}^{-1} = \|\mathbf{\Lambda}\|^{-1} \widehat{\mathbf{\Lambda}} = |\mathbf{\Lambda}|^{-2} \widehat{\mathbf{\Lambda}},$$

здесь  $\widehat{\mathbf{\Lambda}} = \text{scal}\mathbf{\Lambda} - \text{vect}\mathbf{\Lambda}$  – сопряженный кватернион;  $\|\mathbf{\Lambda}\|, |\mathbf{\Lambda}|$  – норма и модуль, определяемые как

$$\|\Lambda\| = |\Lambda|^2 = \Lambda \circ \widehat{\Lambda} = \widehat{\Lambda} \circ \Lambda = \sum_{k=0}^3 \lambda_k^2.$$

Одним из наиболее распространенных подходов к упрощению исходного математического описания трехфазных систем переменного тока различного функционального назначения является переход к новому ортонормированному базису, который в зависимости от класса решаемых задач позволяет осуществить диагонализацию матрицы параметров объекта и таким образом обеспечить автономность каналов управления за счет исключения перекрестных связей, более просто учесть нелинейный характер электромагнитных процессов в электрической цепи, обеспечить астатическое регулирование выхода и т. д. В частности, большинство алгоритмов управления современными устройствами силовой электроники реализуются в преобразованном базисе, получаемом после вращения исходной системы координат  $A, B, C$  на некоторый угол относительно неподвижной эйлеровой оси. В наиболее общем случае угловое движение может быть описано с помощью соответствующей квадратной матрицы размерностью  $\dim 3 \times 3$  с 9-ю направляющими косинусами  $a_{11} \dots a_{33}$

$$\mathbf{x}_{123} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{123} \mathbf{x}_{ABC} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix},$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – элементы трехмерного алгебраического вектора-столбца  $\mathbf{x}_{123}$  после перехода в произвольную систему координат 1,2,3, которое в силу изоморфизма данной математической операции также можно представить в четырехмерном гиперкомплексном пространстве  $\mathbf{H}$  как

$$\mathbf{X}_{123} = \Lambda_{123} \circ \mathbf{X}_{ABC} \circ \Lambda_{123}^{-1} = x_1 \circ \mathbf{q}_1 + x_2 \circ \mathbf{q}_2 + x_3 \circ \mathbf{q}_3, \quad (3)$$

где  $\Lambda_{123}$  – кватернион перехода с произвольной нормой  $\|\Lambda_{123}\| \neq 1$ ,

откуда с учетом некоммутативных правил произведения мнимых единиц (2) становится справедливым

$$\begin{aligned} x_1 &= \|\Lambda_{123}\|^{-1} \circ \left( (\lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2)x_A + 2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3)x_B + 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2)x_C \right), \\ x_2 &= \|\Lambda_{123}\|^{-1} \circ \left( 2(\lambda_2\lambda_1 + \lambda_0\lambda_3)x_A + (\lambda_0^2 + \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_3^2)x_B + 2(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1)x_C \right), \\ x_3 &= \|\Lambda_{123}\|^{-1} \circ \left( 2(\lambda_3\lambda_1 - \lambda_0\lambda_2)x_A + 2(\lambda_3\lambda_2 + \lambda_0\lambda_1)x_B + (\lambda_0^2 + \lambda_3^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2)x_C \right). \end{aligned}$$

В соответствии с последними равенствами, квадратную матрицу  $\mathbf{T}_{123}$  можно представить в функции  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  на основании следующей формулы

$$\mathbf{T}_{123} = \|\Lambda_{123}\|^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3) & 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2) \\ 2(\lambda_2\lambda_1 + \lambda_0\lambda_3) & \lambda_0^2 + \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1) \\ 2(\lambda_3\lambda_1 - \lambda_0\lambda_2) & 2(\lambda_3\lambda_2 + \lambda_0\lambda_1) & \lambda_0^2 + \lambda_3^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 \end{bmatrix},$$

в результате чего воспользовавшись следом  $\text{tr}\mathbf{T}_{123}$  скалярная часть  $\Lambda_{123}$  вычисляется следующим образом

$$\lambda_0 = \pm \|\Lambda_{123}\| \frac{\sqrt{\text{tr}\mathbf{T}_{123} + 1}}{2}, \quad (4)$$

а вещественные коэффициенты при мнимых единицах  $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$  находятся как

$$\lambda_1 = \pm \|\Lambda\| \frac{a_{32} - a_{23}}{4\lambda_0} = \pm \|\Lambda\| \frac{a_{32} - a_{23}}{2\sqrt{\text{tr}\mathbf{T}_{123} + 1}}, \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \pm \|\Lambda\| \frac{a_{13} - a_{31}}{4\lambda_0} = \pm \|\Lambda\| \frac{a_{13} - a_{31}}{2\sqrt{\text{tr}\mathbf{T}_{123} + 1}}, \quad (6)$$

$$\lambda_3 = \pm \|\Lambda\| \frac{a_{21} - a_{12}}{4\lambda_0} = \pm \|\Lambda\| \frac{a_{21} - a_{12}}{2\sqrt{\text{tr}\mathbf{T}_{123} + 1}}. \quad (7)$$

Так, например, применительно к линейному ортогональному преобразованию Е. Clarke с квадратной матрицей

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta o} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\alpha\beta o} \mathbf{x}_{ABC} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix}, \quad (8)$$

в случае пространственного расположения трехфазных переменных  $u_A, u_B, u_C$  в правом ортонормированном базисе гиперкомплексного пространства  $\mathbf{H}$ , образованном  $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ , с совмещением абсциссы с  $\mathbf{q}_1$ , ординаты с  $\mathbf{q}_2$  и направлением аппликаты по  $\mathbf{q}_3$ , формула (3) примет следующий вид

$$\mathbf{X}_{\alpha\beta o} = \Lambda_{\alpha\beta o} \circ \mathbf{X}_{ABC} \circ \Lambda_{\alpha\beta o}^{-1} = x_\alpha \circ \mathbf{q}_1 + x_\beta \circ \mathbf{q}_2 + x_o \circ \mathbf{q}_3,$$

в котором численные значения вещественных коэффициентов  $\Lambda_{\alpha\beta o}$  с учетом (4)–(7) равны

$$\lambda_0 \approx 0,8805, \quad \lambda_1 \approx 0,3647, \quad \lambda_2 \approx -0,2798, \quad \lambda_3 \approx 0,1159.$$

По аналогии, для преобразования R. Н. Park с ортогональной матрицей

$$\mathbf{T}_{dqo}(\gamma_u) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_u & \sin \gamma_u & 0 \\ -\sin \gamma_u & \cos \gamma_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

равенство (3) записывается в виде

$$\mathbf{X}_{dqo} = \Lambda_{dqo}(\gamma_u) \circ \mathbf{X}_{\alpha\beta o} \circ \Lambda_{dqo}^{-1}(\gamma_u) = x_d \circ \mathbf{q}_1 + x_q \circ \mathbf{q}_2 + x_o \circ \mathbf{q}_3,$$

где  $\Lambda_{dqo}(\gamma_u)$  – кватернион вращения плоскости  $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2$  относительно  $\mathbf{q}_3$  на угол  $\gamma_u$

$$\Lambda_{dqo}(\gamma_u) = \cos \frac{\gamma_u}{2} - \sin \frac{\gamma_u}{2} \circ \mathbf{q}_3.$$

В практических приложениях также широко применяется квадратная матрица E. Clarke, отличающаяся от  $\mathbf{T}_{\alpha\beta o}$  в (8) наличием постоянного коэффициента  $k_+$ , аналогом которой в кватернионном базисе является гиперкомплексное число  $\Lambda_{\alpha\beta o}$  с неединичным модулем

$$|\Lambda_{\alpha\beta o}| = \left( \det k_+ \mathbf{T}_{\alpha\beta o} \right)^{-\frac{1}{6}} = \sqrt{k_+}.$$

Обратный переход к вещественным коэффициентам исходного гиперкомплексного числа осуществляется при помощи изменения в (3) порядка чередования прямого и обратного кватернионов перехода и применительно к рассмотренным выше преобразованиям E. Clarke и R. H. Park реализуется в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\alpha\beta o} &= \Lambda_{dqo}^{-1}(\gamma_u) \circ \mathbf{X}_{dqo} \circ \Lambda_{dqo}(\gamma_u) = x_\alpha \circ \mathbf{q}_1 + x_\beta \circ \mathbf{q}_2 + x_o \circ \mathbf{q}_3, \\ \mathbf{X}_{ABC} &= \Lambda_{\alpha\beta o}^{-1} \circ \mathbf{X}_{\alpha\beta o} \circ \Lambda_{\alpha\beta o} = x_A \circ \mathbf{q}_1 + x_B \circ \mathbf{q}_2 + x_C \circ \mathbf{q}_3. \end{aligned}$$

Для выделения из мультигармонического состава генерируемых РСГ трехфазных напряжений произвольной мгновенной формы всех составляющих, отличных от эталонных значений

$$\begin{cases} u_A^* = u_m^* \cos \omega_u t, \\ u_B^* = u_m^* \cos(\omega_u t - 2\pi/3), \\ u_C^* = u_m^* \cos(\omega_u t + 2\pi/3), \end{cases} \quad (9)$$

где  $\omega_u = 100\pi \text{ с}^{-1}$  – угловая частота;  $u_m^*$  – желаемая амплитуда гармонического сигнала,

в диссертации предложено использовать специальный кватернион произведения  $\Delta_{ABC}$ , который после представления (9) и напряжений на выходе силового LC-фильтра  $u_A, u_B, u_C$  в форме гиперкомплексного числа

$$\mathbf{U}_* = u_A^* \circ \mathbf{q}_1 + u_B^* \circ \mathbf{q}_2 + u_C^* \circ \mathbf{q}_3, \quad \mathbf{U}_{ABC} = u_A \circ \mathbf{q}_1 + u_B \circ \mathbf{q}_2 + u_C \circ \mathbf{q}_3,$$

причем

$$\mathbf{U}_{dqo}^* = |\mathbf{U}_*| \circ \mathbf{q}_1 + 0 \circ \mathbf{q}_2 + 0 \circ \mathbf{q}_3,$$

здесь  $|\mathbf{U}_*| = \sqrt{\frac{3}{2}} u_m^*$  – скалярный модуль,

задается в следующем виде

$$\Delta_{ABC} = \mathbf{U}_* \circ \mathbf{U}_{ABC} = \text{scal} \Delta_{ABC} + \text{vect} \Delta_{ABC}, \quad (10)$$

в котором скалярная и мнимая часть вычисляются как

$$\begin{aligned} \text{scal} \Delta_{ABC} &= \delta_{ABC} \circ 1, \quad \text{vect} \Delta_{ABC} = \delta_A \circ \mathbf{q}_1 + \delta_B \circ \mathbf{q}_2 + \delta_C \circ \mathbf{q}_3, \\ \delta_{ABC} &= -u_A^* u_A - u_B^* u_B - u_C^* u_C, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\delta_A = u_B^* u_C - u_C^* u_B, \quad \delta_B = u_C^* u_A - u_A^* u_C, \quad \delta_C = u_A^* u_B - u_B^* u_A. \quad (12)$$

В формулах (11) и (12) содержится полная информация обо всех мгновенных рассогласованиях между желаемыми  $u_A^*, u_B^*, u_C^*$  и текущими  $u_A, u_B, u_C$  значениями трехфазных напряжений. Для инверсного преобразования  $\Delta_{ABC}$  к  $U_{ABC}$  применяется обратный кватернион эталонных значений

$$U_{ABC} = U_*^{-1} \circ (\text{scal}\bar{\Delta}_{ABC} + \text{scal}\tilde{\Delta}_{ABC} + \text{vect}\Delta_{ABC}) = U_{ABC}^+ + U_{ABC}^-, \quad (13)$$

где  $U_{ABC}^+$  и  $U_{ABC}^-$  – кватернионы, отвечающие за симметричную гармоническую составляющую прямой последовательности фаз применительно к (9) и отклонения от  $U_*$  вследствие амплитудно-фазовой асимметрии и наличия высокочастотных гармоник

$$U_{ABC}^+ = U_*^{-1} \circ \text{scal}\bar{\Delta}_{ABC} = -\|U_*\|^{-1} \circ \text{scal}\bar{\Delta}_{ABC} \circ (u_A^* \circ \mathbf{q}_1 + u_B^* \circ \mathbf{q}_2 + u_C^* \circ \mathbf{q}_3), \quad (14)$$

$$U_{ABC}^- = U_*^{-1} \circ (\text{scal}\tilde{\Delta}_{ABC} + \text{vect}\Delta_{ABC}) = U_{ABC} - U_*^{-1} \circ \text{scal}\bar{\Delta}_{ABC}, \quad (15)$$

здесь  $\text{scal}\bar{\Delta}_{ABC}$ ,  $\text{scal}\tilde{\Delta}_{ABC}$  – постоянная и изменяющаяся во времени составляющая скалярной части (10) соответственно.

В целях аналитического исследования гармонического состава  $\Delta_{ABC}$  при различных видах несимметричного энергопотребления, в главе 3 приведены аналитические выражения для численного расчета  $\Delta_{ABC}$ ,  $U_{ABC}^+$  и  $U_{ABC}^-$  в случае различных временных законов изменения напряжений. В частности, при одновременном отклонении мгновенных значений  $u_A, u_B, u_C$  от (9) как по амплитуде  $u_m \neq u_m^*$ , так и по фазе  $\varphi \neq 0$

$$\begin{cases} u_A = u_m (\cos \omega_u t + \varphi), \\ u_B = u_m \cos(\omega_u t - 2\pi/3 + \varphi), \\ u_C = u_m \cos(\omega_u t + 2\pi/3 + \varphi), \end{cases}$$

после выполнения необходимых математических операций становится справедливым

$$\text{scal}\Delta_{ABC} = -\frac{3}{2} u_m^* u_m \cos \varphi = \text{const},$$

$$\text{vect}\Delta_{ABC} = \frac{\sqrt{3}}{2} u_m^* u_m \sin \varphi \circ (\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3) = \text{const},$$

$$U_{ABC}^+ = u_m \cos \varphi \circ (\cos \omega_u t \circ \mathbf{q}_1 + \cos(\omega_u t - 2\pi/3) \circ \mathbf{q}_2 + \cos(\omega_u t + 2\pi/3) \circ \mathbf{q}_3),$$

$$U_{ABC}^- = u_m \sin \varphi \circ (-\sin \omega_u t \circ \mathbf{q}_1 + \sin(\omega_u t + \pi/3) \circ \mathbf{q}_2 + \sin(\omega_u t - \pi/3) \circ \mathbf{q}_3),$$

причем

$$|\Delta_{ABC}| = \sqrt{\delta_{ABC}^2 + \delta_A^2 + \delta_B^2 + \delta_C^2} = \frac{3}{2} u_m^* u_m = \text{const}.$$

На основании математического описания трехфазных токов и напряжений в четырехмерном гиперкомплексном пространстве  $\mathbb{H}$ , а также предварительном расчете специального кватерниона произведения  $\Delta_{ABC}$ , в диссертации предложена новая структурная концепция построения и

организации системы управления силовым преобразовательным устройством в составе РСГ, приведенная на рисунке 2. На функциональной схеме используются следующие обозначения: ПК1, ПК2 – преобразователи вещественных коэффициентов кватерниона трехфазных токов инвертора из  $A, B, C$  в  $d, q, o$  и обратно; РН, РН<sub>dqo</sub> – ПИ-регуляторы модуля  $|\mathbf{U}_{dqo}|$  и отклонений  $u_A, u_B, u_C$  от эталонных величин (9); ТА – тригонометрический анализатор, осуществляющий вычисление заданной величины  $|\mathbf{U}_*|$  и оценку углового положения  $\hat{\gamma}_u^*$  эталонного кватерниона  $\mathbf{U}_*$ ; РТ<sub>d</sub>, РТ<sub>q</sub>, РТ<sub>o</sub> – ПИ-регуляторы выходного тока АИН в осях  $d, q, o$ ; ДПР – динамическая подсистема разделения кватерниона генерируемых РСГ трехфазных напряжений на две составляющие  $\mathbf{U}_{dqo}^+$  и  $\mathbf{U}_{dqo}^-$  в соответствии с формулой (13), в которой для получения информации о постоянной составляющей  $\text{scal}\bar{\Lambda}_{dqo}$  используется фильтр низких частот (ФНЧ) второго порядка с передаточной функцией

$$W_{\text{ФНЧ}}(p) = \frac{1}{\Omega_{\text{ФНЧ}}^{-2} p^2 + A_{\text{ФНЧ}} \Omega_{\text{ФНЧ}}^{-1} p + 1},$$

здесь  $A_{\text{ФНЧ}}, \Omega_{\text{ФНЧ}}$  – коэффициент формы и собственная частота соответственно.

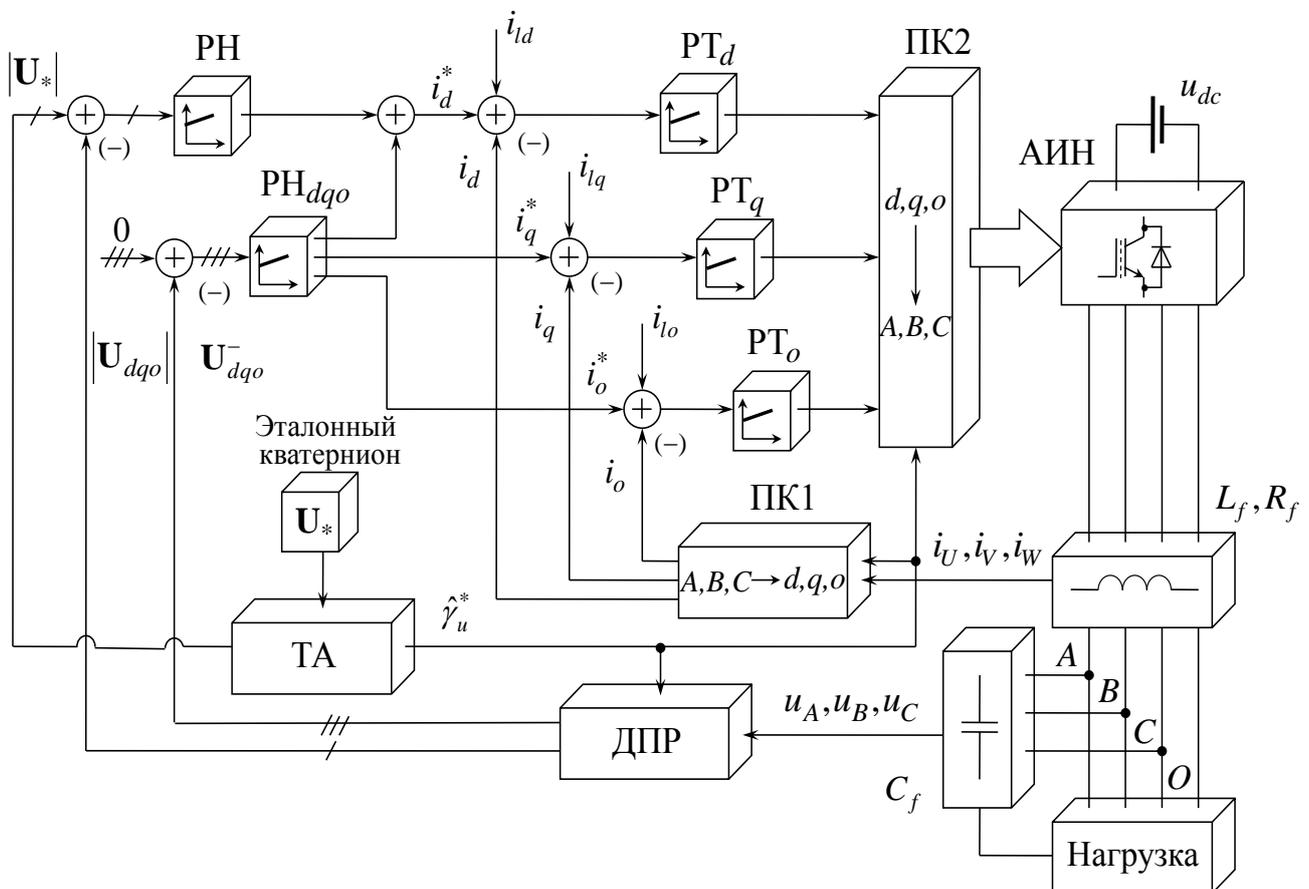


Рисунок 2 – Функциональная схема автономной РСГ с управлением квантернионом напряжения

Аналитическая процедура определения параметров ПИ-регуляторов в предложенной структуре базируется на стандартных методах из теории линейных непрерывных систем, основанных, например, на приведении передаточной функции контура в замкнутом состоянии к желаемому виду или обеспечения заданной формы асимптотической ЛАЧХ в разомкнутом состоянии, в рамках которых достигается нулевая статическая ошибка и требуемые динамические характеристики по выходным управляемым координатам состояния  $d, q, o$ .

В заключительной части главы 3 описана методика структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления автономной системой электропитания в терминах гиперкомплексных чисел, которая обеспечивает нормированное качество генерируемой электрической энергии переменного тока в совокупности с высоким быстродействием в режимах отработки скачкообразных внешних возмущающих воздействий и включает в себя 5-ть пунктов, в рамках которых первоначально осуществляется предварительный анализ нагрузки, далее следует расчет параметров ФНЧ с последующей декомпозицией кватерниона  $U_{ABC}$  на составные части вида (14) и (15) для формирования канала отрицательных обратных связей.

На заключительном этапе производится синтез ПИ-регуляторов с последующей проверкой полученных результатов методом цифрового моделирования и, при необходимости, последующей корректировкой алгоритма.

В целях практической верификации разработанной структурной концепция построения высококачественных быстродействующих трехфазных систем электропитания в диссертации было выполнено цифровое моделирование статических и динамических режимов работы автономной РСГ.

На рисунке 3,а изображены результаты моделирования генерируемых напряжений и токов чисто резистивной электрической цепи, а на рисунке 3,б показаны результаты моделирования в случае подключения нелинейной двухфазной нагрузки.

Внутренний трехканальный контур регулирования выходных токов инвертора настраивался на полосу пропускания в замкнутом состоянии  $2\pi \cdot 750 \text{ с}^{-1}$ , а внешний по отношению к нему четырехканальный контур модуля кватерниона текущих напряжений и их отклонений от (9) на аналогичный параметр, равный  $2\pi \cdot 250 \text{ с}^{-1}$ . Желаемое амплитудное значение напряжений  $u_m^*$  принималось равным 250 В, а ФНЧ имел биномиальное распределение корней с собственной частотой  $100 \text{ с}^{-1}$ .

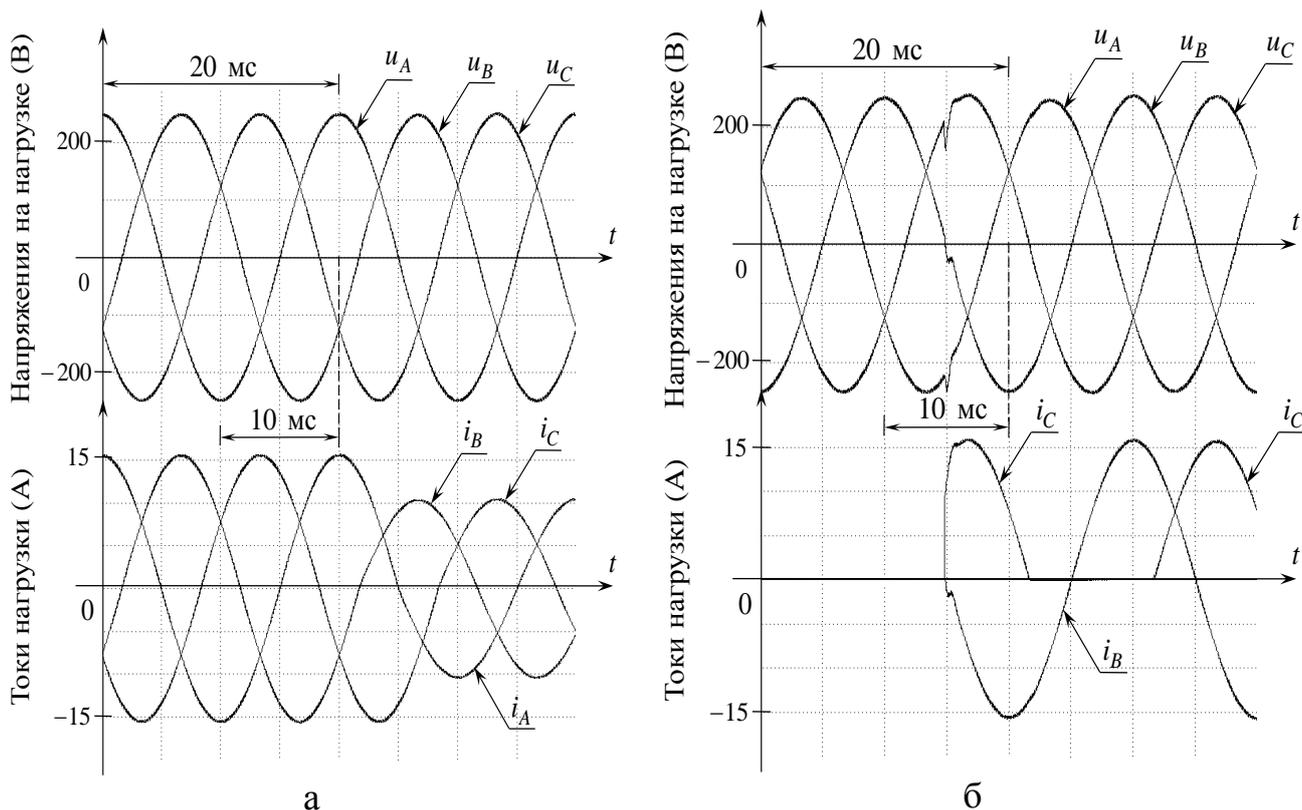


Рисунок 3 – Трёхфазные напряжения и токи на стороне потребителя при скачкообразном изменении (а) чисто активной симметричной нагрузки и (б) при включении нелинейной двухфазной нагрузки

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальной апробации синтезированного алгоритма управления кватернионом генерируемых трехфазных напряжений с теми же параметрами, что и при цифровом моделировании. Специализированная установка включала в себя АИН с четвертой стойкой и частотой коммутации полупроводниковых ключей 15 кГц, звено постоянного тока с напряжением 539 В, силовой LC-фильтр для исключения пульсационной составляющей вследствие ШИМ, а также комплект различного рода одно-/ двух-/ трехфазных симметричных, несимметричных и нелинейных нагрузок с контактными коммутационными аппаратами суммарной мощностью 6 кВт. Управляющая часть системы электропитания, изображенная на рисунке 2, реализовывалась в виде программного кода на базе цифрового микроконтроллера типа ST32F746BGA, а графическая визуализация, фиксация и обработка массива данных о трехфазных величинах осуществлялась с помощью многоканального измерительного комплекса “Genesis Gen7T”.

На рисунке 5,а изображены экспериментальные зависимости генерируемых напряжений и токов чисто резистивной электрической цепи при скачкообразном увеличении активного сопротивления, а на рисунке 5,б показана временная реакция выхода РСГ в случае подключения нелинейной двухфазной нагрузки. В свою очередь на рисунках 6,7 изображены гистограммы качества генерируемой электрической энергии, полученные с помощью специально созданного программного приложения для анализа гармонических сигналов в частотной области.

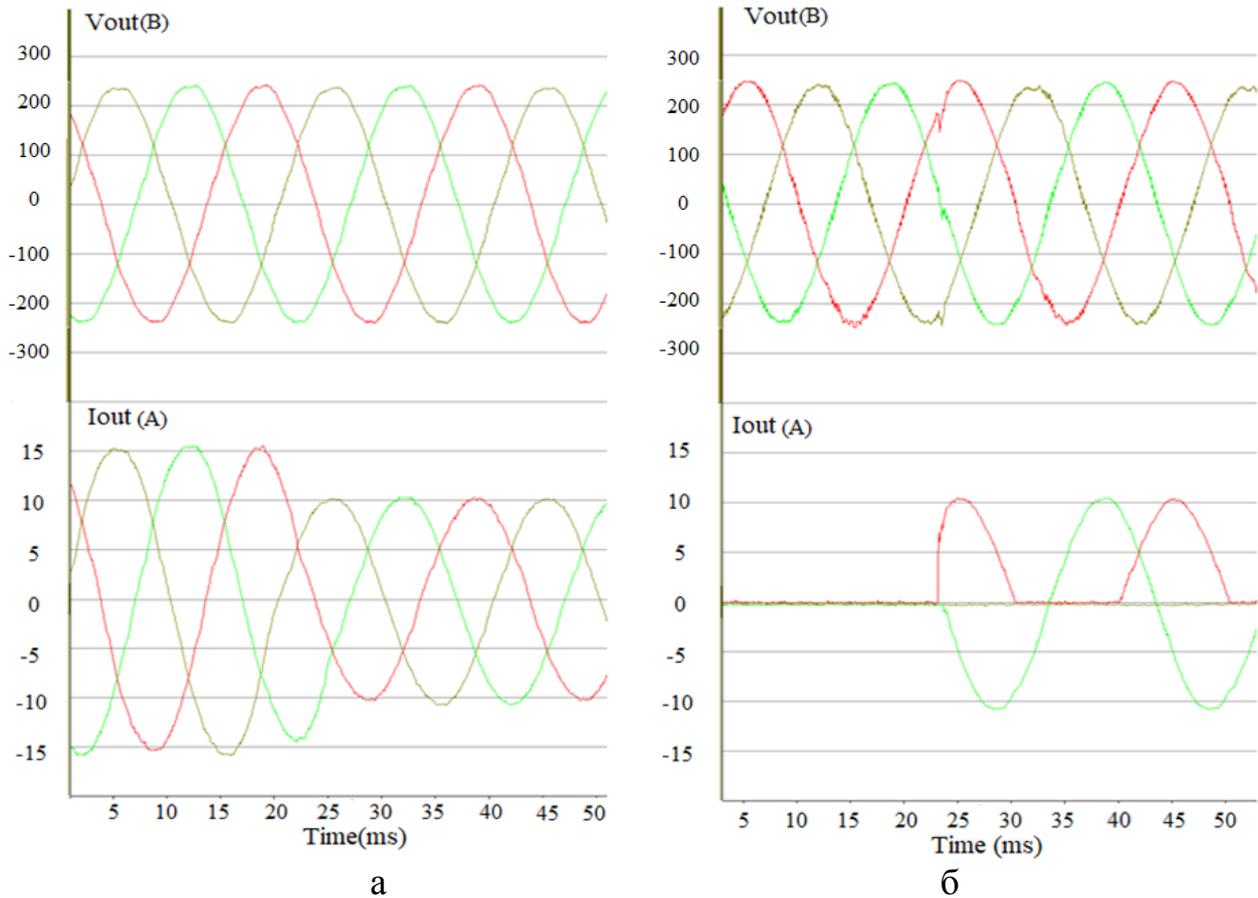


Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости генерируемых напряжений и тока чисто активной трехфазной (а) и нелинейной двухфазной (б) нагрузки

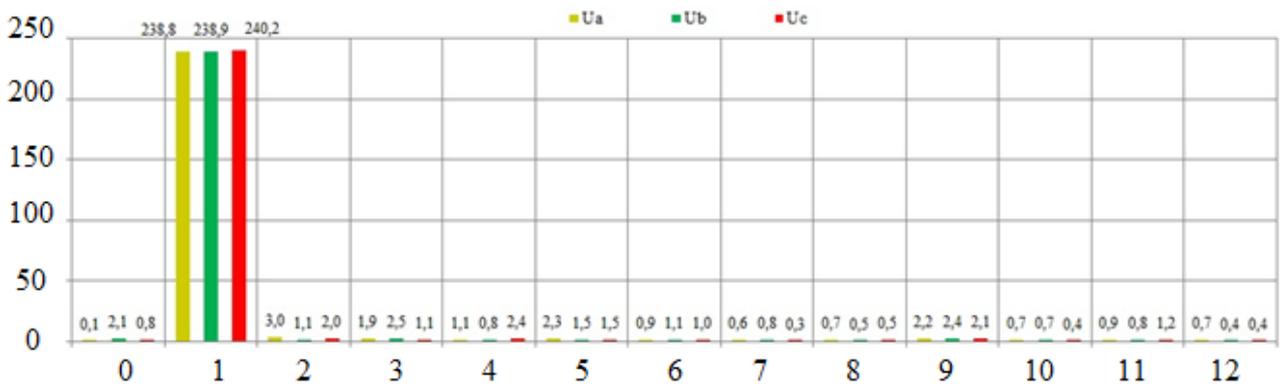


Рисунок 6 – Гармонический состав генерируемого РСГ трехфазного напряжения при питании симметричной чисто резистивной нагрузки

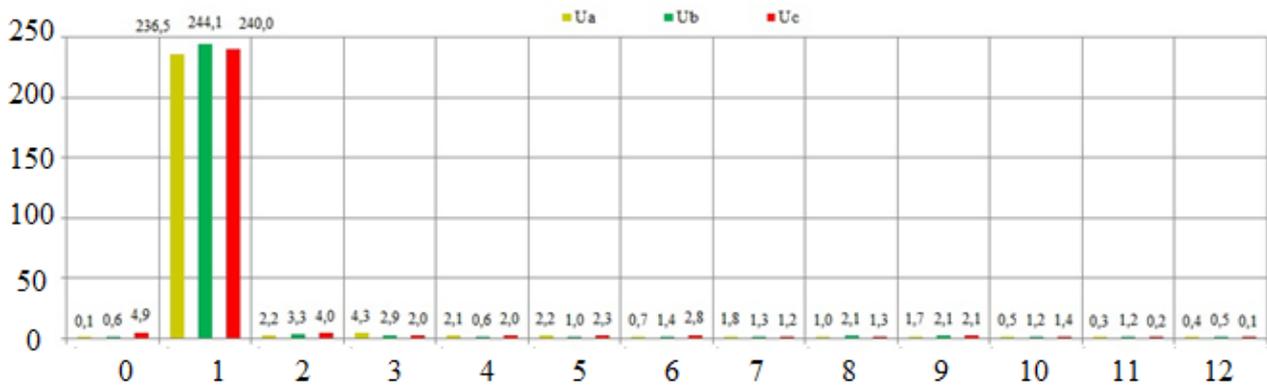


Рисунок 7 – Гармонический состав генерируемого РСГ трехфазного напряжения при питании двухфазной резистивной нагрузки с вентелем

Как видно из представленных выше результатов экспериментального исследования, техническая реализация алгоритма управления РСГ с использованием четырехмерного гиперкомплексного пространства  $\mathbb{H}$ , построенного на основе декомпозиции кватерниона напряжений  $\mathbf{U}_{ABC}$ , обеспечивает качественную работу трехфазной системы переменного тока при питании различного рода потребителей электрической энергии. В установленном процессе мгновенная форма  $u_A, u_B, u_C$  близка к гармоническому закону с незначительной амплитудной ошибкой и только в режимах скачкообразного изменения резкопеременной нагрузки наблюдается ее кратковременное искажение. При этом малая величина времени восстановления достигается без применения каких-либо дополнительных компенсационных связей, предназначенных для автономизации каналов управления объекта в координатах состояния  $d, q, o$ , что объясняется отдельным регулированием прямой последовательности фаз по основной гармонике и всех имеющих место отклонений от нее.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационного исследования, связанного с анализом и синтезом автономной трехфазной системы электропитания с управлением кватернионом напряжения, были решены следующие научно-прикладные задачи:

1. Выполнен подробный анализ функционального назначения, принципа действия и базовых способов управления составных частей РСГ, основными из которых являются полупроводниковый мостовой инвертор, реализованный по топологии с четвертой стойкой, и силовой LC/LCL-фильтр, предназначенный для исключения пульсаций в токах нагрузки вследствие ШИМ.

2. На основании векторно-матричной математической модели РСГ в пространстве состояний после последовательно выполняемых преобразований E. Clarke и R. H. Park, были сформированы базовые алгоритмические принципы построения данного рода трехфазных систем генерации электрической энергии переменного тока с нормированным качеством в терминах некоммутативной ассоциативной алгебры кватернионов.

3. В работе получены расчетные соотношения для практической реализации преобразования исходного трехмерного базиса фазных переменных, образованного тремя мнимыми единицами  $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ , в координаты состояния  $\alpha, \beta, o$  или  $d, q, o$  как в общем виде, так и в частном случае при соблюдении требования инвариантности скалярных частей гиперкомплексного числа.

4. Проанализированы скалярная (действительная) и векторная (мнимая) части специального кватерниона произведения, содержащего в себе полную информацию о положительной, отрицательной и нулевой последовательности фаз генерируемых напряжений на основной частоте, а также о наличии в их составе амплитудно-фазовых отклонений от эталонных значений.

5. Разработана инженерная методика структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления кватернионом напряжения, в рамках которой достигается малое время восстановления заданной мгновенной формы в режимах отработки скачкообразного сброса/наброса или включения/отключения нагрузки произвольного вида, в том числе с нелинейными характеристиками, а также желаемый частотный спектр генерируемой электрической энергии.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Электромагнитные процессы в комбинированной системе электроснабжения / С. А. Харитонов, А. С. Харитонов, В. С. Мешалкин, Д. Л. Калужский, А. В. Коровин // Электропитание. – 2022. – № 1. – С. 4–18.

2. Коровин, А. В. Координатные преобразования трехфазных переменных с использованием кватернионов = Coordinate transformations of three-phase variables using quaternions / А. В. Коровин, И. В. Александров. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1 – С. 65–72. DOI 10.47026/1810-1909-2022-1-65-72.

### *Публикация в материалах международных конференций, входящих в базы данных и системы цитирования Scopus / Web of Science:*

3. Нос, О. В. Синтез алгоритма управления автономной системой энергоснабжения с использованием кватернионов = Control design of standalone distribution generation system in quaternion domain / О. В. Нос, А. В. Коровин, С. В. Кучак. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 1. – С. 7–14. DOI 10.18799/24131830/2022/1/3511.

4. Quaternion control of four-leg inverter for distribution system with harmonic-producing load / O. V. Nos, A. V. Korovin, N. I. Nos, E. S. Kucher. – Text : electronic // 11 International conference on electrical power drive systems (ICEPDS)

: proc., Saint Petersburg, 4–7 Oct 2020. – [S. 1.] : IEEE Publ., 2020. – 6 p. DOI 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249331.

5. Precision radar-station antenna elevation angle electric drive / A. D. Iohimovich, A. V. Korovin, V. V. Pankratov, V. V. Mashinskiy, A. V. Taran // The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014) : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk : IEEE, 2014. – P. 395-398. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882556.

6. Iohimovich A. D. The development of the direct electric drive system of a radar station antenna / A. D. Iohimovich, A. V. Korovin, V. V. Pankratov // 14 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2013), Altai, Erlagol, 1–5 July 2013. – Novosibirsk : NSTU, 2013. – P. 300–304.

*Публикации в российских изданиях, материалах международных и всероссийских конференций:*

7. Следящая система рулевого электропривода на базе СДПМ / А. Д. Иохимович, А. В. Коровин, В. В. Машинский, В. В. Панкратов // 8 международная (19 Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. АЭП–2014 = Proceedings of the 8 International (19 All-Russian) conference on the automatic electric drive, Саранск, 7–9 окт. 2014 г. В 2 т. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 377-381.

8. Прецизионный электропривод угла места антенны радиолокационной станции / Иохимович А. Д., Коровин А. В., Машинский В. В., Панкратов В. В., Таран А. В. // 8 международная (19 Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. АЭП–2014 = Proceedings of the 8 International (19 All-Russian) conference on the automatic electric drive, Саранск, 7–9 окт. 2014 г. В 2 т. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 382-385.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383)346-08-57  
Формат 60x84 1/16. Объём 1 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ № 01190. Подписано в печать 07.07.2022 г.