

На правах рукописи



НОС ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ
С АКТИВНЫМИ СИЛОВЫМИ ФИЛЬТРАМИ В
ГИПЕРКОМПЛЕКСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Новосибирский государственный технический университет”

Научные консультанты:

доктор технических наук, профессор Панкратов Владимир Вячеславович

доктор технических наук, профессор Харитонов Сергей Александрович

Официальные оппоненты:

Гарганеев Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, заведующий кафедрой “Электротехнических комплексов и материалов”

Поляков Владимир Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, профессор кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок”

Розанов Юрий Константинович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, профессор кафедры “Электрические и электронные аппараты”

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники”, г. Томск.

Защита состоится “17” декабря 2015 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Новосибирский государственный технический университет” (630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Новосибирский государственный технический университет” и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан “___” сентября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.04
доктор технических наук, профессор



В.Ю. Нейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время отечественное производство характеризуется высокой долей удельной энергоемкости, которая, как отмечено в “Энергетической стратегии России на период до 2020 г.”, в 2–3 раза превышает аналогичный показатель индустриально развитых зарубежных стран. Данный факт во многом объясняется технологической отсталостью промышленных предприятий, а также отсутствием системного подхода при практической реализации комплекса мер по ресурсо- и энергосбережению, входящих в число приоритетных направлений развития науки, технологии и техники Российской Федерации.

Традиционный подход к повышению энергоэффективности процесса преобразования электрической энергии переменного тока при металлообработке, выплавке стального проката и чугуна, переработке углеводородного сырья и т.д. заключается в использовании конденсаторных батарей или статических синхронных компенсаторов СТАТКОМ, осуществляющих исключение реактивной мощности по основной гармонике. В тоже время в настоящее время наблюдается существенный рост нелинейного энергопотребления, к классу которого относятся силовые полупроводниковые преобразовательные устройства в составе различного рода технологического оборудования, сварочные установки, электролизеры, дуговые сталеплавильные печи, а также бытовые однофазные приемники, такие как, например, офисная оргтехника и люминесцентные лампы.

Наличие в трехфазных системах переменного тока высокочастотных гармоник и параметрическая асимметрия цепей сопровождается широким спектром негативных явлений, основными из которых являются снижение пропускной способности и неравномерная загрузка фаз линий электропередачи, амплитудные скачки напряжения, вызванные наличием субгармонических колебаний, интенсивное старение изоляции, увеличение активных потерь, вызывающих рост расходов на электроэнергию и дополнительный нагрев элементов распределительной сети и т.д.

Наиболее распространенным способом снижения влияния нелинейной нагрузки на качество электрической энергии является использование пассивных узкополосных RLC-фильтров соответствующего порядка, эффективность применения которых во многом определяется текущей нестационарностью, обусловленной температурным дрейфом, отклонениями напряжения сети от номинальных значений, технологическим разбросом параметров и старением элементов. При этом данные силовые корректирующие устройства имеют большие массогабаритные показатели, низкую добротность, функционируют только в ограниченном спектре частот и могут вызывать резко колебательные процессы в энергосистеме.

По этим причинам за рубежом в широком диапазоне мощностей до 60 МВА применяются активные силовые фильтры (АСФ), серийно выпускаемые всеми ведущими мировыми производителями электротехнического оборуду-

дования, которые предназначены для исключения высокочастотных гармоник, коррекции углового сдвига, уменьшения скачков напряжения, уравнивания потенциала нейтрали, демпфирования резонансных явлений и т.д. Принцип действия данного типа полупроводникового устройства, в большинстве случаев реализованного по типовой схеме автономного инвертора напряжения с силовой емкостью, основывается на преднамеренной генерации в трехфазную систему компенсационных воздействий сложной периодической формы, осуществляющих заданное искажение потребляемых от источника несимметричной и/или нелинейной нагрузкой токов/напряжений, вследствие чего обеспечивается синусоидальный закон изменения данных переменных в совокупности с единичным или опережающим коэффициентом мощности при одновременном соблюдении условия симметрии по мгновенным значениям.

Помимо этого, в качестве основных достоинств АСФ необходимо отметить низкий уровень собственных активных потерь, автоматическую подстройку к изменяющимся режимам работы электрооборудования и конфигурации питающей сети, что обеспечивает полную инвариантность к действию сигнальных и параметрических возмущений, а также отсутствие жестких требований к качественному составу электрической энергии, что полностью снимает какие-либо ограничения по области практического применения.

Большой вклад в решение прикладных задач повышения энергоэффективности различного рода электротехнических и электромеханических систем переменного тока, а также в становление и развитие базовых принципов построения АСФ внесли О. А. Маевский, Г. С. Зиновьев, Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, В. Н. Поляков, Ю. К. Розанов, Г. М. Мустафа, Н. Л. Новиков, Г. Г. Жемеров, Н. Akagi, A. Nabae, H. Kim, F. Z. Peng, J.-S. Lai, J.-C. Montaño, P. Salmerón, R. S. Herrera, A. Ferrero, L. Cristaldi и т.д.

Алгоритмические принципы формирования компенсационных воздействий на выходе АСФ в большинстве случаев базируются на постулированных определениях мгновенных мощностей, получаемых как результаты скалярного и векторного произведений трехмерных векторов напряжений и токов во временной области после использования различного рода линейных ортогональных преобразований исходного базиса, что вступает в противоречие с классическими правилами представления данной физической величины, принятыми, например, в механике. Помимо этого, в рамках данного подхода к математическому описанию процесса энергопотребления несимметричной и/или нелинейной трехфазной нагрузки все переменные задаются в векторно-матричной форме записи с использованием метода пространства состояний, что приводит в некоторых случаях к неоднозначности получаемых результатов, т.к. применительно к матрицам-столбцам операция векторного произведения не определена, а техническая реализация синтезированных алгоритмов активной фильтрации требует наличия высокоскоростной микропроцессорной элементной базы.

Описанные выше недостатки можно исключить за счет перехода к анализу режимов работы трехфазных систем переменного тока по мгновенным значе-

ниям с использованием некоммутативной алгебры кватернионов. В этом случае представляется возможным в рамках единого математического аппарата выделить в уравнении баланса мгновенных мощностей вещественную и мнимую составляющие, давая, таким образом, наглядную физическую интерпретацию “полезных” и неэффективных потоков электрической энергии в единицу времени. При этом расчетные соотношения для нахождения текущих значений кватерниона мгновенной мощности трехфазной линейной симметричной нагрузки полностью совпадают с классическими формулами для вычисления активной, реактивной и полной мощностей и непосредственно получаются из результата произведения гиперкомплексных чисел без дополнительного интегрирования квадратичных зависимостей фазных токов и напряжений. В свою очередь аналитическая процедура синтеза алгоритмов активной фильтрации с использованием четырехмерного пространства \mathbb{H} не требует привлечения линейных ортогональных преобразований, что в конечном итоге позволяет сократить количество выполняемых математических операций и таким образом снизить требования по производительности и быстродействию, которые предъявляются к программно-аппаратной части системы управления АСФ.

Целью диссертационной работы является развитие общих положений и методов теории активной и реактивной мгновенных мощностей трехфазных потребителей произвольного вида (нелинейных и несимметричных) в терминах алгебры гиперкомплексных чисел применительно к решению прикладных задач повышения энергоэффективности процессов передачи, распределения и преобразования электрической энергии переменного тока на основе активных силовых фильтров.

Для достижения сформулированной цели требуется решение следующих задач:

1. Провести аналитическое исследование различных форм представления кинематических параметров линейных преобразований фазных переменных с соблюдением условия инвариантности скалярных величин.
2. Обобщить основные положения современных теорий мгновенной мощности несимметричных и/или нелинейных цепей переменного тока с целью выявления имеющих место различного рода недостатков и теоретических противоречий.
3. Проанализировать уравнение баланса мгновенных мощностей трехфазных нагрузок произвольного вида в гиперкомплексном пространстве \mathbb{H} с целью определения его компонент, не участвующих в процессе преобразования электрической энергии на стороне потребителя.
4. Рассмотреть структурно-алгоритмические принципы построения электротехнических и электромеханических систем переменного тока с АСФ, в которых достигается снижение или полное исключение активных потерь от действия неэффективных (неактивных) составляющих мгновенной мощности.
5. Выполнить синтез алгоритмов активной фильтрации в терминах гиперкомплексных чисел, которые могут быть реализованы на менее производительной программно-аппаратной базе или с более высоким быстродействием, чем

традиционные системы управления силовыми преобразовательными устройствами компенсации.

Поставленные задачи решаются на основании использования специальных разделов высшей математики, методов анализа и синтеза теории автоматического управления, теории переходных процессов в электрических цепях переменного тока, математического моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Теоретически и экспериментально обоснована целесообразность практического применения алгебры кватернионов для управления силовыми полупроводниковыми устройствами активной фильтрации при построении энергоэффективных электротехнических систем переменного тока с трехфазными потребителями произвольного вида.

2. Получены аналитические выражения, связывающие между собой различные формы представления кинематических параметров ортогональных преобразований фазных переменных E. Clarke и R. H. Park, которые в зависимости от класса решаемых задач позволяют существенно упростить процедуры анализа и синтеза электротехнических и электромеханических систем переменного тока.

3. На основании выделения в уравнении баланса мгновенных мощностей действительной и мнимой частей, расположенных в отдельных подпространствах, дана физическая интерпретация потоков электрической энергии переменного тока в единицу времени при параметрической асимметрии и нелинейности цепей трехфазного потребителя.

4. Разработан новый теоретический прием к разделению трехфазной системы негармонических токов на активную и реактивную составляющие, позволяющий без дополнительных промежуточных преобразований электрических величин определять компенсационные воздействия на выходе активных силовых фильтров по прямым измерениям напряжений и токов нагрузки.

5. Решена оптимальная задача минимизации нормы кватерниона потребляемых от источника фазных токов, техническая реализация которой в электротехнических и электромеханических системах позволит снизить активные потери от действия неактивных составляющих мгновенной мощности.

6. Синтезированы алгоритмы компенсации кватерниона мгновенной неэффективной мощности, позволяющие обеспечить в трехфазной системе с нагрузкой произвольного вида единичный или опережающий коэффициент мощности при гармонической форме потребляемых от источника токов с одновременным исключением обратной и нулевой последовательностей фаз.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. С единых позиций математического аппарата метода пространства состояний обобщены различные подходы к разделению трехфазной системы негармонических токов на активную и реактивную компоненты, которые бази-

руются на современных теориях мгновенной мощности и элементах векторной алгебры.

2. Определены расчетные соотношения для нахождения координат эйлеровой оси вращения и конечного угла поворота вектора фазных переменных в гиперкомплексном пространстве \mathbb{H} при линейном ортогональном преобразовании исходного базиса E . Clarke.

3. Сформулированы области практического применения алгоритмов компенсации неактивных потоков электрической энергии переменного тока, синтезированных на основе различных современных теорий мгновенной мощности.

4. Разработана инженерная методика синтеза законов управления токами компенсации, основанная на предварительном формировании исключаемого при помощи активного силового фильтра кватерниона мгновенной неэффективной мощности.

5. Получена математическая модель электромагнитных процессов асинхронной машины двойного питания с использованием гиперкомплексных чисел, в которой в явном виде присутствуют вещественная и мнимая части уравнения баланса мгновенной мощности, что создает теоретические предпосылки к синтезу энергооптимальных алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем.

6. Представлены формулы для определения параметров ПИ-регулятора астатического контура регулирования напряжения звена постоянного тока силового полупроводникового устройства активной фильтрации, позволяющего осуществлять предварительный заряд конденсаторной батареи с последующей стабилизацией выходной переменной на заданном уровне.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование практического применения математического аппарата алгебры кватернионов при построении трехфазных систем переменного тока с активными силовыми фильтрами.

2. Инвариантные относительно скалярных величин ортогональные преобразования фазных переменных с использованием кинематических параметров Родрига-Гамильтона.

3. Критерии энергоэффективности электротехнических систем в терминах гиперкомплексных чисел, описывающие качество процесса энергопотребления несимметричных и/или нелинейных нагрузок при произвольной мгновенной форме сигналов.

4. Аналитический метод выделения компенсируемых при помощи активных силовых фильтров неактивных потоков электрической энергии в кватернионном базисе, основанный на разделении уравнения баланса мгновенных мощностей на действительную и мнимую части.

5. Закон оптимального управления силовым преобразовательным устройством компенсации, в рамках которого достигается минимум нормы кватерниона потребляемых токов.

6. Методы синтеза алгоритмов активной фильтрации в четырехмерном гиперкомплексном пространстве, базирующиеся на предварительном искажении токов источника с целью обеспечения их гармонического закона изменения с желаемым угловым сдвигом относительно соответствующего напряжения.

Достоверность полученных в ходе выполнения диссертационного исследования результатов и выводов подтверждается корректной постановкой задач, адекватностью математического аппарата некоммутативной алгебры кватернионов, цифровым моделированием и экспериментальной верификацией.

Реализация результатов работы. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, использованы при проектировании автономных систем энергоснабжения летательных аппаратов в ФГУП ПО “СЕВЕР”, при разработке цифровой системы управления полупроводниковым преобразовательным устройством рекуперации электрической энергии в ЗАО “ЭРАСИБ” г. Новосибирск, а также в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Апробация работы. Основное содержание работы и ее отдельные положения докладывались и обсуждались на семинаре в представительстве компании “Danfoss” в г. Offenbach/Main, ФРГ, а также международных конференциях “Актуальные проблемы электронного приборостроения” в 2008 г., 2010 г., 2012 г., 2014 г. (г. Новосибирск); Научно-технической конференции с международным участием “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” в 2009 г. (г. Новосибирск); Всероссийской научно-практической конференции “Автоматизированный электропривод и промышленная электроника” в 2012 г. (г. Новокузнецк); Международных конференциях по автоматизированному электроприводу в 2012 г. (г. Иваново) и 2014 г. (г. Саранск); Международной научно-технической конференции “Проблемы автоматизированного электропривода: теория и практика” в 2013 г. (Крым, Украина); Международных конференциях молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам в 2012–2015 г.г. (Алтай, Эрлагол).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликована 31 печатная работа, из числа которых 11 входят в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, определенных Высшей аттестационной комиссией.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Она содержит 385 страниц, из которых: 259 стр. – основной машинописный текст, 47 стр. – рисунки и осциллограммы, 54 стр. – приложения, 25 стр. – библиографический список из 211 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен краткий обзор существующих методов и технических средств повышения энергоэффективности процессов передачи, распределения и преобразования электрической энергии в трехфазных системах переменного тока, основанных на принципах пассивной коррекции и активной

фильтрации, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы включает в себя теоретический материал, связанный с ортогональными преобразованиями E. Clarke и R. H. Park применительно к линейно независимой системе трехфазных переменных, которые широко используются при решении прикладных задач анализа переходных процессов в электрических машинах переменного тока, разработки систем векторного управления частотой вращения ротора и магнитным состоянием синхронных и асинхронных электроприводов, формировании компенсационных воздействий на выходе силовых полупроводниковых устройств активной фильтрации и т.д.

Произвольное угловое движение системы координат с фиксированной точкой, к классу которого согласно теореме Л. Эйлера относятся все классические преобразования исходного базиса трехфазных переменных, может быть задано в форме девяти направляющих косинусов с 6-ю уравнениями связей, трех углов Эйлера-Крылова, а также четырех кинематических параметров Родрига-Гамильтона или Кэли-Клейна. Последние два подхода основываются на математическом аппарате некоммутативной алгебры кватернионов, которые представляют собой специальный математический объект, состоящий из одной действительной 1 и трех мнимых единиц $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ с вещественными коэффициентами $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$

$$\Lambda = \lambda_0 \circ 1 + \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3, \quad (1)$$

где \circ – символ умножения,

для которых постулируются 16 правил произведения

$$1 \circ 1 = 1, \quad 1 \circ \mathbf{q}_k = \mathbf{q}_k \circ 1 = \mathbf{q}_k, \quad \mathbf{q}_k \circ \mathbf{q}_l = -\delta_{kl} + \varepsilon_{klm} \circ \mathbf{q}_m, \quad (2)$$

здесь $k, l, m = 1, 2, 3$ – нижний индекс, показывающий порядковый номер мнимой единицы; δ_{kl} – трехмерный символ Кронекера, симметричный по своим индексам $\delta_{kl} = \delta_{lk}$

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{при } k = l, \\ 0, & \text{при } k \neq l; \end{cases}$$

ε_{klm} – антисимметричный по индексам трехмерный символ Леви-Чивиты, который удовлетворяет следующим равенствам

$$\varepsilon_{123} = \varepsilon_{231} = \varepsilon_{312} = 1, \quad \varepsilon_{213} = \varepsilon_{321} = \varepsilon_{132} = -1$$

и равен нулю, если два или три индекса равны друг другу.

В данной некоммутативной алгебре также используются определения сопряженного кватерниона

$$\widehat{\Lambda} = \text{scal}\Lambda - \text{vect}\Lambda,$$

здесь $\text{scal}\Lambda, \text{vect}\Lambda$ – скалярная (действительная) и векторная (мнимая) части соответственно, вычисляемые как

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

нормы

$$\|\Lambda\| = \Lambda \circ \widehat{\Lambda} = \widehat{\Lambda} \circ \Lambda,$$

или иначе модуля

$$|\Lambda| = \sqrt{\Lambda \circ \widehat{\Lambda}} = \sqrt{\widehat{\Lambda} \circ \Lambda},$$

а также обратного кватерниона

$$\Lambda^{-1} = \|\Lambda\|^{-1} \circ \widehat{\Lambda}. \quad (3)$$

В соответствии с правилами некоммутативного умножения (2), $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ являются взаимно перпендикулярными векторами с единичной нормой, образуя между собой правый ортонормированный Q -базис в четырехмерном гиперкомплексном пространстве \mathbf{H} , на основании чего напряжения и токи могут быть представлены в форме кватернионов без скалярных частей

$$\mathbf{X}_{ABC} = x_A \circ \mathbf{q}_1 + x_B \circ \mathbf{q}_2 + x_C \circ \mathbf{q}_3, \quad (4)$$

здесь x_A, x_B, x_C – мгновенные значения трехфазных переменных.

Алгебраическая форма записи гиперкомплексного числа вида (1) является не единственной. Так, например, данный математический объект можно представить в алгебре матриц размерностью $\dim 2 \times 2$ с мнимой единицей $j = \sqrt{-1}$ в следующем виде

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} = \frac{1}{2}(\alpha + \delta)\mathbf{I} + \frac{j}{2}(\beta + \gamma)(-j\mathbf{S}_1) - \frac{1}{2}(\beta - \gamma)(-j\mathbf{S}_2) + \frac{j}{2}(\alpha - \delta)(-j\mathbf{S}_3), \quad (5)$$

где $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ – спиновые матрицы Паули

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

которые совместно с единичной матрицей \mathbf{I} образуют аддитивный четырехмерный базис.

Если к гиперкомплексному числу (4) применить подобное линейное преобразование

$$\mathbf{X} = \Lambda \circ \mathbf{X}_{ABC} \circ \Lambda^{-1}, \quad (6)$$

где Λ – нормированный кватернион вида (1) с $\|\Lambda\| = 1$,

то \mathbf{X} получается путем вращения \mathbf{X}_{ABC} против хода часовой стрелки относительно оси $\text{vect}\Lambda$ на удвоенный угол

$$\frac{\gamma}{2} = \text{arctg} \frac{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2}}{\lambda_0}.$$

На основании свойства изоморфизма данной математической операции по отношению к ортогональным преобразованиям токов и напряжений в трехмерном вещественном пространстве \mathfrak{R}^3 , в работе получены расчетные соотношения для перехода от одной формы представления кинематических параметров к другой, позволяющие в зависимости от класса решаемых задач существенно упрощать последующие процедуры анализа или синтеза электротехнических и

электромеханических систем различного назначения. Так, например, применительно к преобразованию E. Clarke с квадратной ортогональной матрицей вида

$$\mathbf{P}_{\alpha\beta o} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

вещественные коэффициенты кватерниона перехода Λ к координатам состояния α, β, o в (6), носящие название кинематических параметров Родрига-Гамильтона, равны

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

а комплексные величины Кэли-Клейна вида (5)

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,8805 - j0,1159, & \delta &= 0,8805 + j0,1159, \\ \beta &= 0,2798 - j0,3647, & \gamma &= -0,2798 - j0,3647. \end{aligned}$$

В заключение необходимо отметить, что в данной главе также приведены расчетные соотношения для выполнения Clarke Transformation в функции углов Эйлера-Крылова, а также математические модели асинхронного двигателя в Q -базисе со спиновыми матрицами Паули, что дает возможность описать несимметричные режимы работы электрической машины в различных ортонормированных базисах на основании хорошо проработанного математического аппарата функции комплексной переменной.

Во второй главе с единых позиций метода пространства состояний изложены основные положения классических методов расчета линейных электрических цепей при синусоидальной форме сигналов, а также базовые принципы математического описания процесса энергопотребления трехфазных нагрузок общего вида во временной области, в рамках так называемого геометрического подхода, к числу которого относятся:

- исходная и расширенная (видоизмененная) p - q теории активной и реактивной мгновенных мощностей;
- p - q - r теория мгновенной мощности;
- обобщенная теория мгновенной реактивной мощности;
- d - q теория мгновенной мощности;
- векторная формулировка на основе пространственно-ортогональной декомпозиции напряжений.

Необходимость привлечения нетрадиционных подходов к анализу энергетических характеристик трехфазных систем объясняется тем, что использование интегральных оценок или гармонического разложения нелинейных сигналов при синтезе алгоритмов активной фильтрации вносят дополнительное запаздывание в работу АСФ в силу применения усредненных значений и ограниченности членов ряда Фурье.

В 1982–1984 г.г. Н. Akagi, Y. Kanazawa и А. Nabae сформулировали основные положения так называемой исходной $p-q$ теории активной и реактивной мгновенной мощностей, базирующейся на первоначальном линейном ортогональном преобразовании Е. Clarke с квадратной матрицей (7), после которого вводятся следующие определения:

– активная мгновенная мощность, заданная в виде скалярного произведения векторов напряжения и тока в плоскости α, β

$$P_{\alpha\beta} = \vec{u}_\alpha \cdot \vec{i}_\alpha + \vec{u}_\beta \cdot \vec{i}_\beta; \quad (8)$$

– вектор мгновенной реактивной мощности, определяемый на основании правил векторного произведения

$$\vec{q}_{\alpha\beta} = \vec{u}_\alpha \times \vec{i}_\beta + \vec{u}_\beta \times \vec{i}_\alpha,$$

модуль которого находится как

$$|\vec{q}_{\alpha\beta}| = q_{\alpha\beta} = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha; \quad (9)$$

– мгновенная мощность нулевой составляющей, представляющая собой результат скалярного произведения векторов напряжения и тока, направленных по координатной оси аппликат o

$$p_o = \vec{u}_o \cdot \vec{i}_o. \quad (10)$$

Если воспользоваться математическим аппаратом матричного исчисления и представить скалярные величины (8)–(10) в виде трехмерного алгебраического вектора мгновенной мощности

$$\mathbf{p}_{\alpha\beta o} = [P_{\alpha\beta} \quad q_{\alpha\beta} \quad p_o]^T,$$

здесь T – символ транспонирования,

то представляется возможным выполнить следующую декомпозицию токов нагрузки

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o} = \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^p + \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q + \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^o,$$

где $\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^p, \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q, \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^o$ – алгебраические векторы-столбцы мгновенных значений активной, реактивной и нулевой составляющих $\mathbf{i}_{\alpha\beta o}$ в трехмерном вещественном пространстве \mathfrak{R}^3 соответственно

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^p = [i_{\alpha p} \quad i_{\beta p} \quad 0]^T = \frac{P_{\alpha\beta}}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|^2} [u_\alpha \quad u_\beta \quad 0]^T,$$

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q = [i_{\alpha q} \quad i_{\beta q} \quad 0]^T = \frac{q_{\alpha\beta}}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|^2} [-u_\beta \quad u_\alpha \quad 0]^T,$$

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^o = [0 \quad 0 \quad i_o]^T = [0 \quad 0 \quad u_o^{-1} p_o]^T,$$

где $\|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$ – евклидова норма двумерного вектора напряжений в плоскости α, β при соблюдении условия симметрии по мгновенным значениям.

При этом в силу справедливости равенства $\mathbf{u}_{\alpha\beta o}^T \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q = 0$ можно сделать вывод, что координаты $\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q$ не входят в уравнение баланса мгновенных мощностей нагрузки

$$p(t) = \mathbf{u}_{\alpha\beta o}^T \mathbf{i}_{\alpha\beta o} = \mathbf{u}_{\alpha\beta o}^T (\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^p + \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q + \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^o) = p_{\alpha\beta} + p_o, \quad (11)$$

а $q_{\alpha\beta}$ отвечает за потоки электрической энергии в единицу времени, которые не потребляются от источника и циркулируют между трехфазными цепями.

Базируясь на последнем равенстве (11), разработанный Н. Акаги с соавторами подход к анализу процесса энергопотребления нелинейных нагрузок произвольного вида получил свое дальнейшее развитие в виде так называемой расширенной (видоизмененной) $p-q$ теории, на основании которой активная мгновенная мощность задается в виде скалярного произведения трехмерных векторов напряжения и тока в координатах состояния α, β, o

$$P_{\alpha\beta o} = \vec{u}_\alpha \cdot \vec{i}_\alpha + \vec{u}_\beta \cdot \vec{i}_\beta + \vec{u}_o \cdot \vec{i}_o,$$

а пространственный вектор мгновенной реактивной мощности определяется в соответствии с правилами векторного произведения как

$$\vec{q}_{\alpha\beta o} = \vec{u}_{\alpha\beta o} \times \vec{i}_{\alpha\beta o}.$$

Если по аналогии с исходной $p-q$ теорией осуществить переход к скалярным величинам

$$\mathbf{p}_{pq} = [p_{\alpha\beta o} \quad q_\alpha \quad q_\beta \quad q_o]^T, \quad (12)$$

здесь q_α, q_β, q_o – координаты $\vec{q}_{\alpha\beta o}$, определяемые как

$$q_\alpha = u_\beta i_o - u_o i_\beta, \quad q_\beta = u_o i_\alpha - u_\alpha i_o, \quad q_o = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha,$$

на которые в силу имеющего место условия ортогональности $\vec{q}_{\alpha\beta o} \perp \vec{u}_{\alpha\beta o}$ накладывается следующее уравнение связи

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta o}^T \mathbf{q}_{\alpha\beta o} = u_\alpha q_\alpha + u_\beta q_\beta + u_o q_o = 0, \quad (13)$$

то в рамках данного подхода к математическому описанию процесса энергопотребления алгебраический вектор $\mathbf{i}_{\alpha\beta o}$ можно представить в виде линейной комбинации двух членов

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o} = \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^p + \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q,$$

где $\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^p, \mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q$ – алгебраические векторы-столбцы мгновенных значений активной и реактивной составляющих $\mathbf{i}_{\alpha\beta o}$ в трехмерном вещественном пространстве \mathfrak{R}^3 соответственно

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^p = \begin{bmatrix} i_\alpha^p & i_\beta^p & i_o^p \end{bmatrix}^T = \frac{P_{\alpha\beta o}}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|_2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & u_o \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q = \frac{1}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|_2} \begin{bmatrix} (u_o q_\beta - u_\beta q_o) & (u_\alpha q_o - u_o q_\alpha) & (u_\beta q_\alpha - u_\alpha q_\beta) \end{bmatrix}^T,$$

где $\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|$ – евклидова норма трехмерного вектора напряжений в координатах состояния α, β, o

$$\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\| = \sqrt{\mathbf{u}_{\alpha\beta o}^T \mathbf{u}_{\alpha\beta o}} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_o^2},$$

причем реактивную компоненту $\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q$ в свою очередь можно также разложить на три слагаемых

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta o}^q = \mathbf{i}_\alpha^q + \mathbf{i}_\beta^q + \mathbf{i}_o^q,$$

которые отвечают за образование соответствующей координаты пространственного вектора $\vec{q}_{\alpha\beta o}$ и находятся как

$$\mathbf{i}_\alpha^q = \frac{1}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|^2} \begin{bmatrix} (u_o q_\beta - u_\beta q_o) & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{i}_\beta^q = \frac{1}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|^2} \begin{bmatrix} 0 & (u_\alpha q_o - u_o q_\alpha) & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{i}_o^q = \frac{1}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & (u_\beta q_\alpha - u_\alpha q_\beta) \end{bmatrix}^T.$$

Основная сложность синтеза компенсационных воздействий на выходе АСФ с использованием постулированных определений исходной и расширенной (видоизмененной) $p-q$ теорий заключается в наличии перекрестных связей между каналами управления, т.к. не существует однозначной зависимости между токами и компонентами алгебраического вектора мгновенной мощности. Для устранения данного недостатка в 1999 г. была предложена так называемая $p-q-r$ теория мгновенной мощности, которая базировалась на трехкратном линейном преобразовании исходного базиса фазных переменных с последующей ориентацией одной из осей по опорному вектору напряжений, представленного как

$$\mathbf{u}_{pqr} = \mathbf{L} \mathbf{u}_{\alpha\beta o} = \begin{bmatrix} u_p & 0 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\| & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (14)$$

здесь \mathbf{L} – ортогональная матрица перехода

$$\mathbf{L} = \frac{1}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & u_o \\ -u_\beta \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\| & u_\alpha \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\| & 0 \\ \frac{-u_\alpha u_o}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|} & \frac{-u_\beta u_o}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|} & \|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\| \end{bmatrix}.$$

По аналогии с двумя вышеописанными $p-q$ теориями, активная мгновенная мощность в координатах состояния p, q, r задается в виде скалярного

произведения трехмерных векторов напряжения и тока, которая с учетом (14) находится как

$$P_{pqr} = \vec{u}_p \cdot \vec{i}_p = \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\| i_p,$$

а мгновенная реактивная мощность определяется на основании правил векторного произведения как

$$\vec{q}_{pqr} = \vec{u}_{pqr} \times \vec{i}_{pqr},$$

в соответствии с которым проекция \vec{q}_{pqr} на ось абсцисс p равна нулю, а на две другие будет подчиняться следующим равенствам

$$q_q = -\|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\| i_r, \quad q_r = \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\| i_q,$$

или при обратном переходе к токам с использованием векторно-матричной формы записи

$$\mathbf{i}_{pqr} = \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{pqr} \\ q_q \\ q_r \end{bmatrix}.$$

В соответствии с проведенным во второй главе диссертации подробном анализе базовых положений современных теорий мгновенной мощности, в работе были выявлены их следующие недостатки:

1. Одновременное применение в двух $p-q$ и одной $p-q-r$ теориях математических аппаратов матричного исчисления и векторной алгебры приводит в некоторых случаях к неоднозначности получаемых результатов, т.к. операция векторного произведения применительно к матрицам-столбцам не определена. При этом представление мгновенной мощности в форме пространственного вектора вступает в противоречие с классическими правилами математического описания данной скалярной величины, принятыми, например, в механике.

2. В расширенной $p-q$ теории линейная комбинация токов является функцией четырех линейно-зависимых координат \mathbf{p}_{pq} вида (12), причем нулевая компонента преобразования E. Clarke i_o одновременно зависит от одной активной и двух реактивных мгновенных мощностей. По этой причине для полного исключения потерь в нейтральном проводе и геометрическом отображении энергетических показателей в трехмерном вещественном пространстве \mathcal{R}^3 необходимо применять дополнительное преобразование \mathbf{p}_{pq} с учетом имеющего места уравнения связи (13).

3. Основным достоинством $p-q-r$ теории является линейная зависимость всех трех токов от соответствующих мгновенных мощностей, что полностью исключает перекрестные связи между каналами нагрузки и существенно облегчает анализ энергетических процессов в трехфазных цепях. Однако при данном подходе тепловые потери в нулевом проводе определяются совокупным действием активного и реактивного токов по координатам состояния p и r соответственно, что приводит к существенному усложнению структуры системы

управления АСФ применительно к трехфазным системам с глухо заземленной нейтралью.

4. Модуль результирующего вектора мгновенных мощностей не всегда удовлетворяет формуле произведения евклидовых норм токов и напряжений, как, например, в случае исходной $p-q$ теории, что не позволяет использовать данный количественный показатель в качестве аналога полной мощности применительно к мгновенным значениям.

5. Техническая реализация синтезированных на основе геометрического подхода алгоритмов активной фильтрации требует наличия высокопроизводительной микропроцессорной элементной базы из-за необходимости предварительного ортогонального преобразования фазных переменных, перемножения координат трехмерных векторов и хранения 9-ти элементов матриц.

В заключение также необходимо отметить, что в данной главе подробно рассмотрены основные положения обобщенной или иначе кросс-векторной теории мгновенной реактивной мощности, $d-q$ теории мгновенной мощности с использованием ортогонального преобразования R. Н. Park и функции комплексной переменной, а также формулировки, базирующейся на ортогональной декомпозиции трехмерного пространственного вектора напряжений в \mathfrak{R}^3 .

Третья глава диссертационной работы посвящена анализу влияния различных видов трехфазных нагрузок, в том числе несимметричных и нелинейных, на норму и вещественные коэффициенты кватерниона мгновенной мощности с целью определения его неактивных (неэффективных) составляющих, подлежащих последующему исключению из общего потока электрической энергии при помощи АСФ.

При использовании ортонормированного Q -базиса уравнение баланса мгновенных мощностей описывается следующей зависимостью

$$\mathbf{P}_{ABC} = \mathbf{U}_{ABC} \circ \mathbf{I}_{ABC} = \text{scal}\mathbf{P}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC}, \quad (15)$$

здесь $\mathbf{U}_{ABC}, \mathbf{I}_{ABC}$ – кватернионы фазных напряжений и токов вида (4)

$$\mathbf{U}_{ABC} = u_A \circ \mathbf{q}_1 + u_B \circ \mathbf{q}_2 + u_C \circ \mathbf{q}_3, \quad \mathbf{I}_{ABC} = i_A \circ \mathbf{q}_1 + i_B \circ \mathbf{q}_2 + i_C \circ \mathbf{q}_3;$$

$\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}$ – скалярная (действительная) часть \mathbf{P}_{ABC}

$$\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} = -(u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) \circ 1; \quad (16)$$

$\text{vect}\mathbf{P}_{ABC} = q_A \circ \mathbf{q}_1 + q_B \circ \mathbf{q}_2 + q_C \circ \mathbf{q}_3$ – векторная (мнимая) часть \mathbf{P}_{ABC} , в которой вещественные коэффициенты перед $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ находятся как

$$q_A = u_B i_C - u_C i_B, \quad q_B = u_C i_A - u_A i_C, \quad q_C = u_A i_B - u_B i_A. \quad (17)$$

На первоначальном этапе анализа энергетических характеристик трехфазной системы в четырехмерном гиперкомплексном пространстве \mathbf{H} было принято допущение о подключении нагрузки к источнику с симметричной системой напряжений

$$\begin{cases} u_A = u_m \cos \omega t, \\ u_B = u_m \cos(\omega t - 120^\circ), \\ u_C = u_m \cos(\omega t + 120^\circ), \end{cases} \quad (18)$$

где u_m – амплитуда гармонического сигнала с угловой частотой $\omega = 100\pi \text{ с}^{-1}$, в которой присутствует только прямая последовательность фаз, а обратная и нулевая отсутствуют. Как показало проведенное аналитическое исследование, при чисто активном потреблении электрической энергии с одинаковыми параметрами сопротивлений r во всех трех фазах, скалярная часть кватерниона мгновенной мощности будет постоянной величиной с численным значением

$$\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} = -\frac{3}{2}u_m^2 r^{-1}, \quad (19)$$

а векторная часть будет отсутствовать

$$\text{vect}\mathbf{P}_{ABC} = 0. \quad (20)$$

В свою очередь при одинаковом фазовом сдвиге φ относительно соответствующих напряжений всех трех токов с максимальным мгновенным значением i_m , вещественные коэффициенты \mathbf{P}_{ABC} будут также постоянными величинами в функции угла

$$\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} = -\frac{3}{2}u_m i_m \cos \varphi, \quad (21)$$

$$q_A = q_B = q_C = \frac{\sqrt{3}}{2}u_m i_m \sin \varphi. \quad (22)$$

Если $\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}$ представить в виде вектора в трехмерном подпространстве \mathbf{H} с базисными ортами $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$, то в зависимости от знака φ он будет располагаться в I или VII октантах и иметь модуль

$$|\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}| = \sqrt{-\text{vect}^2\mathbf{P}_{ABC}} = \frac{3}{2}u_m i_m \sin \varphi, \quad (23)$$

в результате чего аналогичный скалярный показатель кватерниона мгновенной мощности будет также иметь постоянное значение

$$|\mathbf{P}_{ABC}| = \frac{3}{2}u_m i_m = \bar{P}_{ABC} = \text{const}, \quad (24)$$

или окончательно в более общем случае

$$\|\mathbf{P}_{ABC}\| = \|\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}\| + \|\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}\| = \|\mathbf{U}_{ABC}\| \circ \|\mathbf{I}_{ABC}\| = \bar{P}_{ABC}^2.$$

Как видно из представленных выше аналитических зависимостей применительно к симметричным RLC-нагрузкам, формулы (21), (23) и (24) полностью совпадают с классическими выражениями для вычисления активной, реактивной и полной мощностей, однако при этом описывают не усредненные за период величины, а мгновенные режимы работы трехфазных систем и не требуют дополнительного интегрирования квадратичных зависимостей фазных токов и напряжений. При этом геометрическое изображение на плоскости модулей скалярной и векторной частей \mathbf{P}_{ABC} позволяет применять на практике хорошо проработанные методы анализа установившихся процессов линейных синусоидальных цепей с использованием комплексной плоскости.

При отличии тока фазы A от двух других, как по амплитуде i_{mA} , так и по угловому сдвигу φ_A , после выполнения необходимых математических действий формулы (16) и (17) примут следующий вид

$$\begin{aligned} \text{scal}\mathbf{P}_{ABC} &= (B - \bar{P}_{ABC}) + A \sin 2\omega t + B \cos 2\omega t, \\ q_B &= 0,5(\sqrt{3}A + B + (\sqrt{3}B + A)\sin 2\omega t - (\sqrt{3}A - B)\cos 2\omega t), \\ q_C &= 0,5(\sqrt{3}A - B + (\sqrt{3}B - A)\sin 2\omega t - (\sqrt{3}A + B)\cos 2\omega t), \end{aligned}$$

где A, B – амплитудные значения удвоенных гармоник $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}$, сдвинутых относительно друг друга на четверть периода, которые определяются как

$$A = 0,5u_m i_{mA} \sin \varphi_A, \quad B = 0,5u_m (i_m - i_{mA} \cos \varphi_A),$$

причем

$$q_A = u_B i_C - u_C i_B = 0.$$

В свою очередь, как показало аналитическое исследование кватерниона мгновенной мощности при произвольной мгновенной форме потребляемых токов, результаты которого в силу большого объема и громоздкости не представлены в данном автореферате, скалярная и векторная части \mathbf{P}_{ABC} содержат средние составляющие $\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$ и $\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$, отвечающие за преобразование электрической энергии на стороне потребителя с учетом имеющих место тепловых потерь и классическую реактивную мощность сдвига соответственно, относительно которых происходят мультигармонические колебания. При этом в частном случае линейной зависимости трехфазных переменных применительно к трехпроводной нагрузке, вещественные коэффициенты q_A, q_B, q_C равны друг другу, что позволяет упростить структуру алгоритма формирования компенсационных воздействий на выходе АСФ.

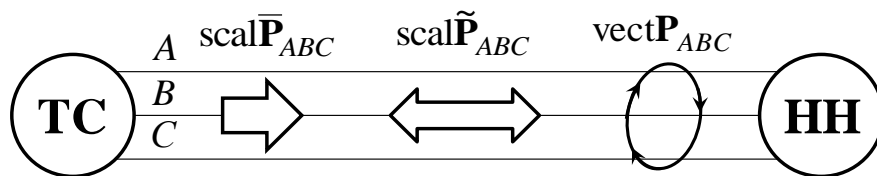


Рисунок 1 – Упрощенная функциональная схема распределения мгновенных мощностей несимметричной трехфазной системы в гиперкомплексном пространстве \mathbf{H}

Обобщая вышеизложенное можно заключить, что любое отличие в параметрах нагрузки одной из фаз по отношению к двум другим или искажению в синусоидальной форме потребляемых токов будет приводить к возникновению периодических колебаний в $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}$, отвечающих за обмен электромагнитной энергией между источником $\mathbf{ТС}$ и потребителем $\mathbf{НН}$, что иллюстрирует рисунок 1, с одновременным появлением векторной составляющей кватерниона мгновенной мощности, причем вещественный коэффициент мнимой части, отвечающий за нелинейный участок, будет равен нулю. На основании этого мож-

но заключить, что $\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}$ образуется вследствие отклонения токов и/или напряжений от симметричного гармонического закона изменения во времени и отвечает за потоки электрической энергии в единицу времени, которые не потребляются от источника и циркулируют между фазами системы. Данное утверждение также вытекает из однофазного случая, при котором $\text{vect}\mathbf{P}_{ABC} = 0$.

В диссертации также выполнено аналитическое исследование \mathbf{P}_{ABC} в наиболее общем случае при произвольной мгновенной форме сигналов, которое базировалось на предварительном разложении нелинейных функций в ряд Фурье с последующим представлением каждой из гармоник в виде суммы прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что для повышения энергоэффективности процессов передачи, распределения и преобразования электрической энергии переменного тока необходимо исключать при помощи АСФ из состава кватерниона мгновенной мощности мнимую часть $\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}$, а также переменную составляющую $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$.

В заключительной части 3 главы отмечено, что практическое использование Q -базиса позволяет описать процесс энергопотребления в рамках единого математического аппарата без привлечения, например, элементов аналитической геометрии или матричного исчисления, что в конечном итоге позволяет устранить теоретические противоречия современных теорий мгновенной мощности, вызванных, например, отсутствием строго определения векторного произведения применительно к матрицам-столбцам, а разделение уравнения баланса мгновенных мощностей (15) на вещественную и мнимую части дает наглядную интерпретацию потоков электрической энергии в единицу времени, выделяя в них “полезную” и неэффективную (компенсируемую) составляющие.

Четвертая глава диссертации связана с процедурами структурно-параметрического синтеза и технической реализации алгоритмов активной фильтрации, полученных на основании правил некоммутативной алгебры кватернионов и постулированных определений современных теорий мгновенной мощности.

В зависимости от конкретного выбора компенсационных воздействий различают последовательные (series active power filter) и параллельные (shunt active power filter) АСФ, а также их последовательно-параллельную комбинацию, которая при ее дополнении аккумуляторной батареей в зарубежных литературных источниках получила название Unified power quality conditioner. При этом как показывает многолетний опыт применения силовых преобразовательных устройств активной фильтрации на предприятиях черной и цветной металлургии, тяговых подстанциях железнодорожного транспорта, объекта инфраструктуры коммунального хозяйства и т.д., первый способ подключения АСФ относительно нагрузки не нашел широкого применения на практике в силу того, что полное исключение из общего потока электрической энергии всех неактивных составляющих достигается только в случае симметричного синусоидального закона изменения трехфазных токов, представляющего интерес только с теоре-

тической точки зрения. По этой причине в диссертации более подробно рассмотрены структурные принципы организации токовой компенсации, представленной на рисунке 2, на котором используются следующие обозначения: **СУ** – система управления, осуществляющая выработку задающих воздействий i_c^* на основании текущей информации с датчиков тока **UA** и напряжения **UV**; **АИН** – автономный инвертор напряжения, период переключения полупроводниковых приборов которого должен быть более чем на порядок меньше, чем аналогичный временной интервал наивысшей компенсируемой гармоники; **С** – конденсаторная батарея, предназначенная для поддержания на постоянном уровне напряжения u_{dc} с требуемой величиной отклонения, а также для хранения и обмена реактивной электрической энергией; **РТ** – трехканальный регулятор токов i_c ; **L** – индуктивный дроссель, являющийся нагрузкой **АИН**, осуществляющий снижение пульсаций в компенсационных воздействиях i_c с одновременным ограничением их производных.

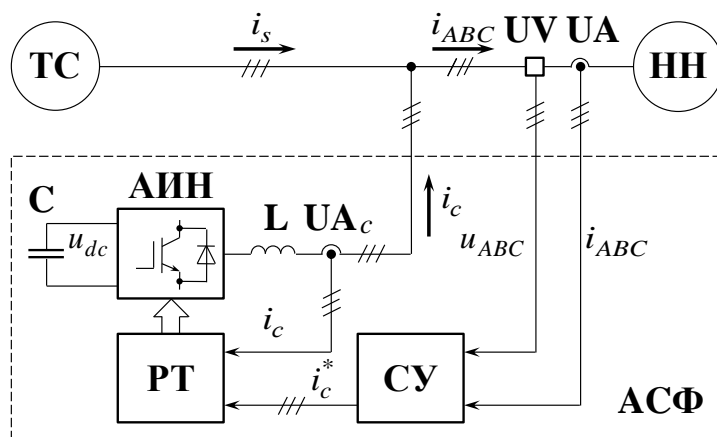


Рисунок 2 – Функциональная схема трехфазной системы с параллельным АСФ

Конструктивное исполнение АСФ в сетях переменного тока общего назначения до 1 кВ основывается на бестрансформаторном варианте с двухуровневым мостовым инвертором, которое применительно к трехфазным системам с глухозаземленной нейтралью может быть реализовано на схемотехнических решениях с подключением средней точки конденсаторной батареи к нулевому проводу (split-capacitor three-leg), за счет применения четвертой стойки (four-leg full-bridge) или их совместной комбинации. В свою очередь в диапазоне средних напряжений силовая часть АСФ может быть построена по многоуровневой схеме с емкостным делителем (neutral-point-clamped converter) или с плавающими конденсаторами (flying capacitor converter), либо в виде последовательного соединения ячеек Н-мостов (cascaded H-bridge converter), что в конечном итоге позволяет использовать менее дорогие полупроводниковые приборы, в качестве которых выступают IGBT-модули, полностью управляемые тиристоры GTO, а также запираемые тиристоры с коммутацией по затвору GCT или их усовершенствованная модификация IGCT.

При параллельном подключении АСФ относительно трехфазной нагрузки, силовое полупроводниковое устройство активной фильтрации функционирует в режиме безынерционного источника тока, реализуемого в классе законов разрывного или непрерывного управлений. В первом случае частота автоколебательного режима работы может задаваться шириной петли релейного гистерезисного элемента или малой постоянной времени дифференцирующего фильтра второго порядка в канале отрицательной обратной связи, а во втором путем настройки характеристического полинома на желаемое распределение корней с полосой пропускания контура в замкнутом состоянии не менее 1 кГц.

Помимо описания квалификационных признаков и структурных принципов построения силовой части АСФ, в 4 главе также представлены результаты синтеза алгоритмов активной фильтрации, полученных в рамках базовых положений современных способов описания энергетических характеристик трехфазных систем с использованием математического аппарата векторной алгебры, в соответствии с которыми к числу неактивных составляющих общего потока электрической энергии в единицу времени относятся:

- мгновенная реактивная (неактивная) мощность, вызванная параметрической асимметрией и/или искажениями в гармонической форме сигналов;
- нулевая мгновенная мощность, отвечающая за тепловые потери в нейтральном проводе;
- переменная составляющая активной мгновенной мощности, описывающая процессы обмена электрической энергией между сетью и потребителем.

В наиболее общем случае конечная цель компенсационной задачи формулируется в виде требований приведения потребляемой от источника мгновенной мощности $p_s(t)$ и ее реактивной компоненты $q(t)$ к некоторому желаемому состоянию, которые в аналитической форме задаются в форме следующих равенств

$$p_s(t) = p_s^*, \quad q(t) = q^*,$$

где p_s^*, q^* – эталонные значения,

которые в большинстве технических приложений выбирают из условий

$$p_s^* = \bar{p}(t) = \text{const}, \quad q^* = 0, \quad (25)$$

здесь $\bar{p}(t)$ – мгновенная мощность при чисто резистивном симметричном энергопотреблении,

следствием чего является следующее интегральное ограничение

$$\bar{p}_c = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{u}_{ABC}^T \mathbf{i}_c) dt = 0,$$

где T – временной интервал усреднения; $\mathbf{u}_{ABC} = [u_A \quad u_B \quad u_C]^T$ – алгебраический вектор столбец фазных напряжений; $\mathbf{i}_c = [i_{cA} \quad i_{cB} \quad i_{cC}]^T$ – алгебраический вектор-столбец токов компенсации,

физически означающее отсутствие средней активной мощности на выходе АСФ, причем на представленные выше равенства может также накладываться дополнительное условие, заключающееся в исключении тока в нулевом проводе

$$\sum_{j=ABC} i_j = 0. \quad (26)$$

Синтез алгоритмов активной фильтрации на основании постулированных определений исходной $p-q$ теории в диссертации выполнялся в рамках обеспечения в трехфазной системе с АСФ критериев (25) и (26) при выборе компенсируемого вектора мгновенной мощности в следующем виде

$$\mathbf{p}_{\alpha\beta o}^* = [\tilde{p}_{\alpha\beta} - \bar{p}_o \quad q_{\alpha\beta} \quad p_o]^T,$$

где $\tilde{p}_{\alpha\beta}, \bar{p}_o$ – переменная и постоянная составляющие активной и нулевой мгновенных мощностей соответственно, получаемые на выходе специальных динамических подсистем оценки,

в результате чего токи на выходе АСФ будут описываться следующей аналитической зависимостью:

$$\mathbf{i}_c = \mathbf{P}_{\alpha\beta o}^T \|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|^{-2} \left((\tilde{p}_{\alpha\beta} - \bar{p}_o - \Delta\bar{p}_c) \mathbf{D}_o^2 + q_{\alpha\beta} \mathbf{D}_o + \frac{p_o \|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|^2}{u_o^2} (\mathbf{E} + \mathbf{D}_o^2) \right) \mathbf{u}_{\alpha\beta o}, \quad (27)$$

здесь $\Delta\bar{p}_c$ – активная составляющая мгновенной мощности, характеризующая потери в силовой емкости и полупроводниковых ключах автономного инвертора АСФ, а также в сглаживающих дросселях; \mathbf{E} – единичная матрица размерностью $\dim 3 \times 3$; \mathbf{D}_o – вырожденная кососимметрическая матрица поворота вектора против хода часовой стрелки в плоскости α, β на угол $\pi/2$, исключая координату по оси o

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

В свою очередь при использовании расширенной (видоизмененной) $p-q$ теории закон управления АСФ принимает вид

$$\mathbf{i}_c = \mathbf{P}_{\alpha\beta o}^T \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|^{-2} \left((\tilde{p}_{\alpha\beta o} - \Delta\bar{p}_c) \mathbf{E} + q_\alpha \mathbf{D}_\alpha + q_\beta \mathbf{D}_\beta + q_o \mathbf{D}_o \right) \mathbf{u}_{\alpha\beta o}, \quad (28)$$

где $\tilde{p}_{\alpha\beta o}$ – переменная составляющая активной мгновенной мощности $p_{\alpha\beta o}$; \mathbf{D}_α – вырожденная кососимметрическая матрица поворота вектора против хода часовой стрелки в плоскости β, o на угол $\pi/2$, исключая первую координату по оси α

$$\mathbf{D}_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

\mathbf{D}_β – вырожденная кососимметрическая матрица поворота вектора против хода часовой стрелки в плоскости o, α на угол $\pi/2$, исключая вторую компоненту по оси β

$$\mathbf{D}_\beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а при $p-q-r$ теории

$$\mathbf{i}_c = \|\mathbf{u}_{\alpha\beta o}\|^{-1} \mathbf{P}_{\alpha\beta o}^T \mathbf{L}^T \left((\mathbf{E} + \mathbf{D}_\alpha^2) + \mathbf{D}_o \mathbf{D}_\beta - \mathbf{D}_\beta \mathbf{D}_o \right) \mathbf{p}_{pqr}^*, \quad (29)$$

здесь $\mathbf{p}_{pqr}^* = \begin{bmatrix} \tilde{p}_{pqr} & q_q - u_o \|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|^{-1} p_{pqr} & q_r \end{bmatrix}^T$ – трехмерный алгебраический вектор-столбец компенсируемой мгновенной мощности.

Как видно из представленных выше результатов синтеза, техническая реализация (27)–(29) требует выполнения большого количества математических операций и, как следствие, наличия в составе АСФ высокопроизводительных программно-аппаратных средств управления.

На основании представленных в 3 главе результатов гармонического анализа кватерниона мгновенной мощности трехфазной нагрузки при подключении к источнику с симметричной системой напряжений вида (18), в работе были сформулированы следующие основные подходы к повышению энергоэффективности электротехнических систем с АСФ в терминах гиперкомплексных чисел.

1. Совместное исключение углового сдвига φ и нулевой последовательности фаз по всем гармоникам.

Данная прикладная задача решается за счет полной компенсации мнимой части (15)

$$\mathbf{P}_c = \text{vect} \mathbf{P}_{ABC}, \quad (30)$$

вследствие чего исключаются потери в нейтральном проводе, а потребляемые токи будут совпадать по фазе с соответствующими напряжениями, однако при этом их мгновенная форма будет существенно отличаться от синусоидального вида.

2. Исключение обратной последовательности фаз по всем членам разложения в ряд Фурье.

Сформулированный данным образом критерий энергоэффективности достигается за счет формирования на выходе АСФ кватерниона мгновенной мощности в следующем виде

$$\mathbf{P}_c = \text{scal} \tilde{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect} \tilde{\mathbf{P}}_{ABC}, \quad (31)$$

где $\text{scal} \tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$, $\text{vect} \tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$ – переменные составляющие, получаемые по аналогии с $\tilde{p}_{\alpha\beta}$ в (27) на выходе специальных динамических подсистем оценки, благодаря чему имеет место гармонический закон изменения i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} , сумма текущих значений которых в любой момент времени не равна нулю.

3. Одновременное исключение обратной и нулевой последовательностей фаз по всем гармоникам.

Данное требование реализуется при помощи совместной компенсации $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$ и векторной части \mathbf{P}_{ABC}

$$\mathbf{P}_c = \text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC}, \quad (32)$$

вследствие чего в токах источника будет присутствовать только прямая последовательность фаз как в случае чисто резистивной нагрузки вне зависимости от конкретного вида несимметричных и/или нелинейных электрических цепей потребителя.

4. Генерирование реактивной мощности при синусоидальном законе изменения потребляемых токов.

При функционировании АСФ в качестве источника реактивной энергии, правая часть (32) дополняется вспомогательным членом $\Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$, отвечающим за желаемый фазовый сдвиг φ

$$\mathbf{P}_c = \text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC} \pm \Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}, \quad (33)$$

благодаря чему мгновенная форма потребляемых токов будет повторять соответствующие напряжения с заданным угловым смещением.

Учитывая тот факт, что математический аппарат четырехмерных гиперкомплексных чисел относится к алгебре с делением, то переход от кватерниона мгновенной мощности к токам можно выполнить в соответствии со следующей формулой

$$\mathbf{I}_{ABC} = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC}), \quad (34)$$

где \mathbf{U}_{ABC}^{-1} – обратный кватернион фазных напряжений вида (3), при определении которого норма в случае справедливости системы уравнений (18) вычисляется как

$$\|\mathbf{U}_{ABC}\| = \frac{3}{2}u_m^2 = \text{const}. \quad (35)$$

Воспользовавшись (34), \mathbf{I}_{ABC} можно представить в виде следующей линейной комбинации

$$\mathbf{I}_{ABC} = \mathbf{I}_{ABC}^p + \mathbf{I}_{ABC}^q, \quad (36)$$

здесь $\mathbf{I}_{ABC}^p, \mathbf{I}_{ABC}^q$ – активная и реактивная составляющие соответственно

$$\mathbf{I}_{ABC}^p = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \text{scal}\mathbf{P}_{ABC}, \quad \mathbf{I}_{ABC}^q = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \text{vect}\mathbf{P}_{ABC},$$

нормы которых связаны между собой на основании следующего уравнения

$$\|\mathbf{I}_{ABC}\| = \|\mathbf{I}_{ABC}^p\| + \|\mathbf{I}_{ABC}^q\| = \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \|\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}\| + \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \|\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}\|.$$

В свою очередь, осуществляя переход к алгебраической форме записи (1) становится справедливым

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{ABC}^p &= i_A^p \circ \mathbf{q}_1 + i_B^p \circ \mathbf{q}_2 + i_C^p \circ \mathbf{q}_3, \\ \mathbf{I}_{ABC}^q &= (i_A - i_A^p) \circ \mathbf{q}_1 + (i_B - i_B^p) \circ \mathbf{q}_2 + (i_C - i_C^p) \circ \mathbf{q}_3, \end{aligned}$$

где i_A^p, i_B^p, i_C^p – вещественные коэффициенты при мнимых единицах в \mathbf{I}_{ABC}^p

$$i_j^p = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ u_j \circ \text{scal}\mathbf{P}_{ABC},$$

здесь $j = A, B, C$ – нижний индекс, показывающий буквенное обозначение фазы,

причем в силу того, что в кватернионе мгновенного реактивного тока отсутствует действительная часть

$$\text{scal}\mathbf{I}_{ABC}^q = \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (u_A q_A + u_B q_B + u_C q_C) = 0, \quad (37)$$

скалярные величины q_A, q_B, q_C в случае симметричной системы напряжений (18) являются линейно-зависимыми.

Выполненный в диссертации подробный анализ линейного разложения вида (36) показал, что индуктивные и/или емкостные элементы, по аналогии с классическими методами расчета цепей переменного тока, вызывают появление кватерниона реактивного мгновенного тока \mathbf{I}_{ABC}^q , сдвинутого относительно \mathbf{U}_{ABC} на угол $\varphi = \pm 90^\circ$, причем мнимая часть \mathbf{I}_{ABC} в общем случае зависит не только от углового сдвига φ , но и от амплитудной асимметрии и искажений в гармонической форме сигналов.

При этом в случае явно выраженного нелинейного характера процессов в составе \mathbf{I}_{ABC}^p и \mathbf{I}_{ABC}^q можно также отдельно выделить составляющие в функции основной частоты питающего напряжения

$$\bar{\mathbf{I}}_{ABC}^p = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}, \quad \bar{\mathbf{I}}_{ABC}^q = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC},$$

а также отличные от них мультигармонические компоненты

$$\tilde{\mathbf{I}}_{ABC}^p = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC}, \quad \tilde{\mathbf{I}}_{ABC}^q = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \text{vect}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC},$$

в результате чего каждый член линейной комбинации (36) можно представить в виде суммы двух слагаемых

$$\mathbf{I}_{ABC}^p = \bar{\mathbf{I}}_{ABC}^p + \tilde{\mathbf{I}}_{ABC}^p, \quad \mathbf{I}_{ABC}^q = \bar{\mathbf{I}}_{ABC}^q + \tilde{\mathbf{I}}_{ABC}^q,$$

причем из формул (19) и (20) для расчета \mathbf{P}_{ABC} чисто резистивной трехфазной нагрузки следует, что $\bar{\mathbf{I}}_{ABC}^p$ выступает в качестве эталона энергопотребления.

Основываясь на описанном выше теоретическом приеме к выделению в кватернионе \mathbf{I}_{ABC} активной и реактивной частей, в диссертации была решена задача минимизации активных потерь по мгновенным значениям, заданная в форме следующего квадратичного функционала качества

$$f(\|\mathbf{I}_{ABC}^p\|) = \mathbf{I}_{ABC}^p \circ \bar{\mathbf{I}}_{ABC}^p = \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (\text{scal}\mathbf{P}_{ABC})^2, \quad (38)$$

с ограничением в виде преобразованного уравнения связи (37)

$$\varphi(\mathbf{I}_{ABC}^q) = \mathbf{U}_{ABC} \circ \mathbf{I}_{ABC}^q - \text{vect}\mathbf{P}_{ABC} = 0.$$

Воспользовавшись методом множителей Лагранжа, экстремум (38) достигается при следующем расчетном соотношении

$$\mathbf{I}_{ABC}^q = \mathbf{I}_{ABC} + \frac{\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}}{\|\mathbf{U}_{ABC}\|} \circ \mathbf{U}_{ABC},$$

которое реализуется при формировании на выходе АСФ следующих компенсационных воздействий

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \text{vect} \mathbf{P}_{ABC} = \mathbf{I}_{ABC}^q, \quad (39)$$

в результате чего кватернион потребляемых от источника токов в соответствии с рисунком 2 будет подчиняться следующей аналитической зависимости

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = -\frac{\text{scal} \mathbf{P}_{ABC}}{\|\mathbf{U}_{ABC}\|} \circ \mathbf{U}_{ABC}.$$

Техническая реализация оптимального в рамках квадратичного критерия (38) алгоритма управления АСФ вида (39) при симметричной системе напряжений (18) позволит полностью исключить тепловые потери в нулевом проводе, однако наличие в вещественных коэффициентах \mathbf{I}_s обратной последовательности фаз приведет к тому, что их мгновенная форма будет существенно отличаться от гармонического закона.

Аналитическая процедура синтеза алгоритмов активной фильтрации с использованием гиперкомплексного пространства \mathbf{H} основывается на предварительном формировании компенсируемого кватерниона неэффективной (неактивной) мгновенной мощности \mathbf{P}_c , переход от которого к выходным токам АСФ базируется на формуле (34) и в наиболее общем случае имеет следующий вид

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \mathbf{P}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\text{scal} \mathbf{P}_c + \text{vect} \mathbf{P}_c). \quad (40)$$

В зависимости от конкретного выбора одного из описанных выше четырех критериев энергоэффективности вида (30)–(33), в диссертации получены различные модификации закона управления (40) при принятии допущения о подключении потребителя электрической энергии к источнику с симметричной синусоидальной системой напряжений (18).

1. Коррекция углового сдвига φ в линейных активно-реактивных электрических цепях с одинаковым полным сопротивлением всех фаз, которая в соответствии с формулой (22) имеет место в случае

$$\mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ \left(\frac{\sqrt{3}}{2} u_m i_m \sin \varphi \circ (\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3) - \Delta \bar{p}_c \right), \quad (41)$$

где $\Delta \bar{p}_c$ – гиперкомплексная переменная, отвечающая по аналогии с (27)–(29) за активные потери в силовых цепях АСФ,

в результате чего кватернион токов источника с учетом (21) и (24) принимает следующий вид

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = i_{sA} \circ \mathbf{q}_1 + i_{sB} \circ \mathbf{q}_2 + i_{sC} \circ \mathbf{q}_3 = \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (\bar{P}_{ABC} - \Delta \bar{p}_c) \circ \mathbf{U}_{ABC}.$$

2. Исключение обратной последовательности фаз по всем гармоникам, достигаемое в рамках выбора \mathbf{P}_c в виде (31), при котором

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{scal} \tilde{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect} \tilde{\mathbf{P}}_{ABC} - \Delta \bar{p}_c),$$

или иначе

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{scal} \bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect} \bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta \bar{p}_c), \quad (42)$$

откуда

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c).$$

3. Исключение нулевой последовательности фаз по всем гармоникам с одновременным устранением углового сдвига φ , совпадающее с результатом минимизации квадратичного функционала (38) в рамках решения задачи об условном экстремуме, которое после дополнения (30) слагаемым $\Delta\bar{p}_c$ принимает следующий вид

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{vect}\mathbf{P}_{ABC} - \Delta\bar{p}_c),$$

или окончательно

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\mathbf{P}_{ABC} - \text{scal}\mathbf{P}_{ABC} - \Delta\bar{p}_c) = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c), \quad (43)$$

вследствие чего кватернион токов источника будет зависеть от $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$, которая в общем случае носит сложный нелинейный характер

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c) \circ \mathbf{U}_{ABC}.$$

4. Обеспечение гармонического закона потребляемых токов с нулевым угловым смещением φ относительно соответствующего напряжения, реализуемое за счет выбора \mathbf{P}_c в соответствии с равенством (32), на основании которого

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC} - \Delta\bar{p}_c),$$

или иначе

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c). \quad (44)$$

При технической реализации (44) из состава \mathbf{I}_s исключаются нулевая и обратная последовательности фаз по всем элементам разложения \mathbf{I}_{ABC} в ряд Фурье, в результате чего потребляемые токи будут однозначно определяться симметричной системой напряжений (18)

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c) \circ \mathbf{U}_{ABC},$$

или в развернутом виде

$$\mathbf{I}_s = i_{sm} \cos \omega t \circ \mathbf{q}_1 + i_{sm} \cos(\omega t - 120^\circ) \circ \mathbf{q}_2 + i_{sm} \cos(\omega t + 120^\circ) \circ \mathbf{q}_3,$$

где i_{sm} – максимальное мгновенное значение

$$i_{sm} = -\frac{2}{3} \circ \frac{\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c}{u_m}.$$

5. Генерация реактивной мощности при гармоническом законе изменения i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} , в рамках которой алгоритм активной фильтрации (40) с учетом формул (15) и (33) принимает следующий вид

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} \mp \Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c), \quad (45)$$

где $\Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$ – векторная часть \mathbf{P}_c , задающая требуемое угловое смещение φ , которое с учетом (35) определяется как

$$\Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} = \frac{\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c}{\sqrt{3}} \circ \text{tg} \varphi \circ (\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3).$$

Таким образом, при формировании на выходе параллельного АСФ компенсационных воздействий в соответствии с законом управления (45), удастся добиться опережающего или отстающего коэффициента мощности при синусоидальной форме токов источника, описываемых уравнением

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} \mp \Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c).$$

При этом также необходимо отметить, что в случае отклонения напряжений от системы уравнений (18), при определении вещественных коэффициентов обратного кватерниона \mathbf{U}_{ABC}^{-1} необходимо использовать прямую последовательность фаз u_A, u_B, u_C по основной гармонике.

Синтезированные выше алгоритмы активной фильтрации (41)–(45) могут также реализовываться без промежуточного вычисления компенсируемых составляющих уравнения баланса мгновенных мощностей (15) за счет применения линейной комбинации (36). Так, например, закон управления (44) на основании постулированных определений кватернионов активного и реактивного мгновенных токов преобразуется к следующему виду

$$\mathbf{I}_c = \tilde{\mathbf{I}}_{ABC}^p + \mathbf{I}_{ABC}^q - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \Delta\bar{p}_c = \mathbf{I}_{ABC} - \bar{\mathbf{I}}_{ABC}^p - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \Delta\bar{p}_c, \quad (46)$$

в котором гиперкомплексная переменная $\bar{\mathbf{I}}_{ABC}^p$ выделяется из \mathbf{I}_{ABC} при помощи узкополосных фильтров, настроенных на частоту питающего напряжения.

Для получения текущей информации о постоянных составляющих вещественных коэффициентов \mathbf{P}_{ABC} или \mathbf{I}_{ABC} в составе управляющего устройства АСФ реализуется специальная подсистема оценки, динамика которой в наиболее общем случае описывается следующим дифференциальным уравнением в операторной форме записи

$$\bar{y}(t) = W(p)y(t),$$

где $y(t)$ – произвольная функция времени; $W(p)$ – передаточная функция без форсирующих свойств с характеристическим полиномом n -ого порядка

$$D(p) = p^n + A_{n-1}\Omega p^{n-1} + \dots + A_1\Omega^{n-1}p + \Omega^n, \quad (47)$$

здесь p – оператор дифференцирования; A_f , $f = \overline{1, n-1}$ – коэффициенты формы; Ω – среднегеометрический корень, определяющий быстродействие переходных процессов при выделении $\bar{y}(t)$.

Техническая реализация алгоритмов компенсации вида (41)–(46) в гиперкомплексном пространстве \mathbf{H} сопровождается необходимостью решения частной задачи, связанной с поддержанием на постоянном уровне u_{dc}^* напряжения u_{dc} на силовом емкостном фильтре \mathbf{C} , переставленного при дальнейшем синтезе математической моделью в форме стационарного интегрирующего звена с коэффициентом передачи k_c , что иллюстрирует рисунок 3, на котором используются следующие обозначения: **УФЗ** – безынерционный узел формирования кватерниона гармонических задающих воздействий $\Delta\mathbf{I}_c^*$; **КРТ** – внутренний трехканальный контур регулирования выходных токов АСФ, динамика которо-

го описывается пропорциональным звеном с обратной величиной коэффициента передачи канала отрицательной обратной связи k_i^{-1} ; **UV** – датчик напряжения с коэффициентом k_u ; **РН** – ПИ-регулятор с передаточной функцией вида

$$W_{\text{РН}}(p) = k_{\text{РН}} \frac{T_{\text{РН}}p + 1}{p}.$$

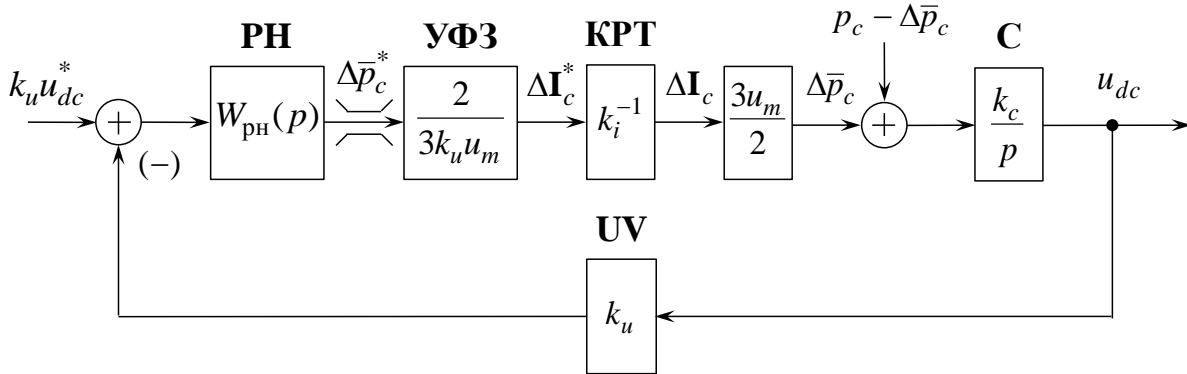


Рисунок 3 – Структурная схема контура регулирования u_{dc} в замкнутом состоянии

При данном выборе последовательного корректирующего устройства передаточная функция контура в замкнутом состоянии находится как

$$W_{\text{крн}}(p) = \frac{k_u^{-1}(T_{\text{РН}}p + 1)}{\frac{k_i}{k_{\text{РН}}k_c}p^2 + T_{\text{РН}}p + 1} = \frac{k_u^{-1}(T_{\text{РН}}p + 1)}{T_{\text{крн}}^2 p^2 + 2\xi_{\text{крн}}T_{\text{крн}}p + 1},$$

в результате чего, осуществляя выбор коэффициента демпфирования $\xi_{\text{крн}}$ и постоянной времени $T_{\text{крн}}$, которая должна удовлетворять неравенству

$$T_{\text{крн}} \gg \omega_{\text{пи}}^{-1},$$

где $\omega_{\text{пи}}$ – полоса пропускания **КРТ**,

из условия нормированного распределения корней характеристического полинома, параметры ПИ-регулятора определяются в соответствии с формулами

$$k_{\text{РН}} = \frac{k_i}{k_c T_{\text{крн}}^2} = \frac{C u_{dc}^* k_i}{T_{\text{крн}}^2}, \quad T_{\text{РН}} = 2\xi_{\text{крн}} T_{\text{крн}}. \quad (48)$$

В свою очередь блок **УФЗ**, предназначенный для выработки кватерниона задающих воздействий на внутренний трехканальный контур регулирования токов в соответствии со следующим законом

$$\Delta \mathbf{I}_c^* = k_i \circ \Delta \mathbf{I}_c = -\frac{2\Delta \bar{p}_c^*}{3k_u u_m^2} \circ (u_A \circ \mathbf{q}_1 + u_B \circ \mathbf{q}_2 + u_C \circ \mathbf{q}_3),$$

где $\Delta \bar{p}_c^*$ – выход регулятора напряжения **РН**,

осуществляет формирование добавки $-\Delta \bar{p}_c^*$ к скалярной части $\text{scal} \mathbf{P}_c$, в результате чего токи компенсации \mathbf{I}_c будут содержать в своем составе основную гармонику с амплитудой

$$\Delta i_{cm} = -\frac{2}{3u_m} \Delta \bar{p}_c.$$

Пятая глава содержит результаты проведенных экспериментальных исследований синтезированных алгоритмов активной фильтрации с использованием гиперкомплексного пространства \mathbf{H} . На рисунке 4 изображена функциональная схема специализированной установки, построенной на базе общепромышленного преобразователя частоты типа “ЭРАТОН-М4” мощностью 15 кВт, состоящего из конденсаторной батареи \mathbf{C} суммарной емкостью 2,35 мФ, автономного инвертора напряжений $\mathbf{АИН}$, трехканального ПИ-регулятора токов $\mathbf{РТ}$ и блока широтно-импульсной модуляции $\mathbf{ШИМ}$ с опорной частотой дискретизации 2,7 кГц. Помимо этого, в качестве составных элементов исследуемой трехфазной системы с АСФ выступали понижающий трансформатор $\mathbf{Тр}$ с коэффициентом передачи 0,625, сглаживающие дроссели \mathbf{L} индуктивностью 9,4 мГн, предназначенные для ограничения амплитуды пульсаций и производных выходных токов компенсации \mathbf{I}_c , несимметричная нелинейная трехфазная \mathbf{RL} -нагрузка с полупроводниковыми вентилями $\mathbf{НН}$, многоканальные блоки аналогово-цифрового $\mathbf{АЦП}$ и цифро-аналогового $\mathbf{ЦАП}$ преобразований, а также датчики тока \mathbf{UA} и напряжения \mathbf{UV} с коэффициентами передачи $0,18 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1}$ и $0,01$ соответственно. Формирование задающих воздействий \mathbf{I}_c^* в цифровой системе управления $\mathbf{СУ}$ осуществлялось с помощью управляющей программы на языке $\mathbf{C++}$, которые после $\mathbf{ЦАП}$ преобразовывались в непрерывные сигналы и поступали на вход аналогового контура регулирования токов с частотой среза в разомкнутом состоянии $\omega_{ci} = 2\pi \cdot 700 \text{ с}^{-1}$.

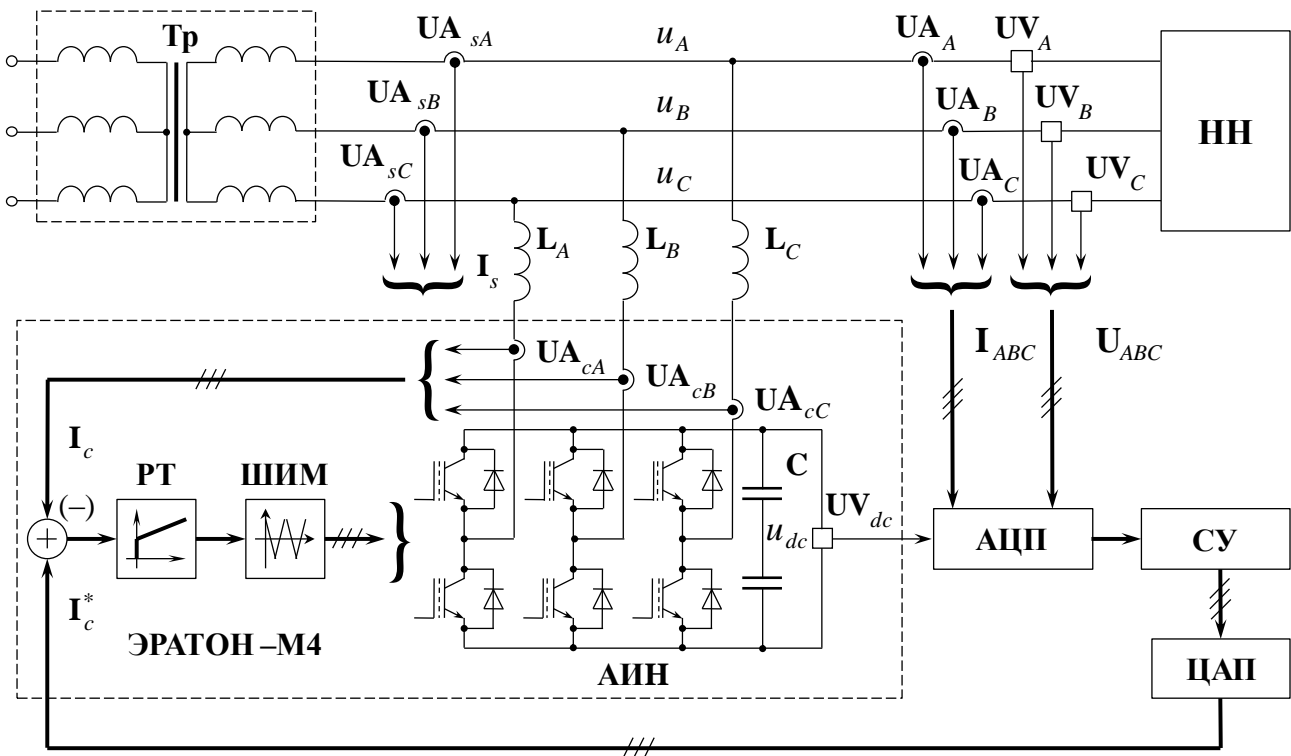


Рисунок 4 – Функциональная схема экспериментальной установки

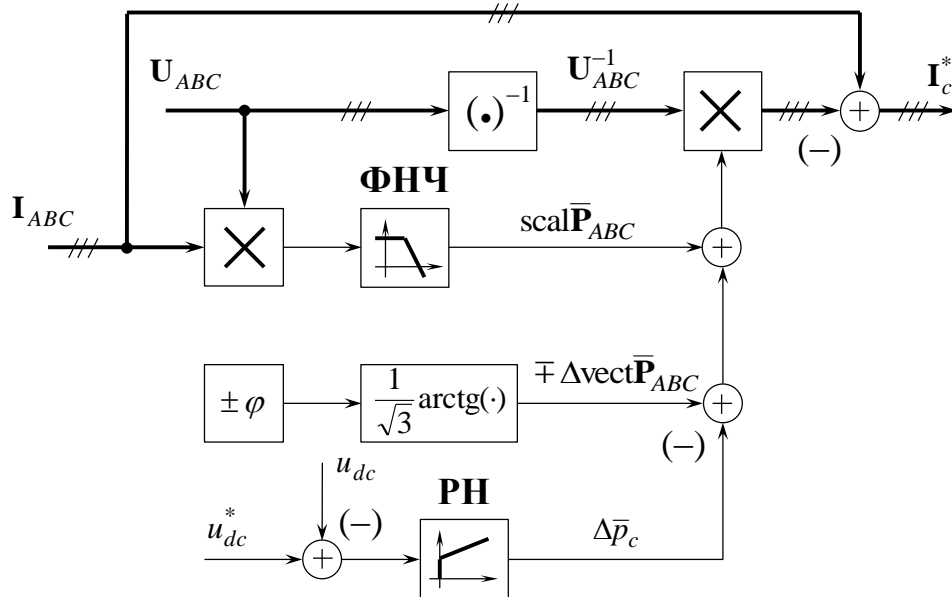


Рисунок 5 – Функциональная схема системы управления АСФ

В качестве исследуемых законов управления АСФ выступали алгоритмы активной фильтрации вида (44) и (45), обеспечивающие совместное исключение обратной и нулевой последовательностей фаз в токах источника i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} по всем гармоникам в совокупности с желаемым угловым сдвигом φ относительно соответствующего напряжения, которые реализовывались в соответствии с функциональной схемой, изображенной на рисунке 5.

На рисунке 6 приведены осциллограммы фазных напряжений и токов нагрузки, иллюстрирующие явно выраженный нелинейный характер процессов в электрических цепях, а на рисунке 7 соответствующие им скалярная часть scalP_{ABC} , а также вещественные коэффициенты мнимой составляющей q_A, q_B, q_C , которые в силу отсутствия нулевого провода равны друг другу.

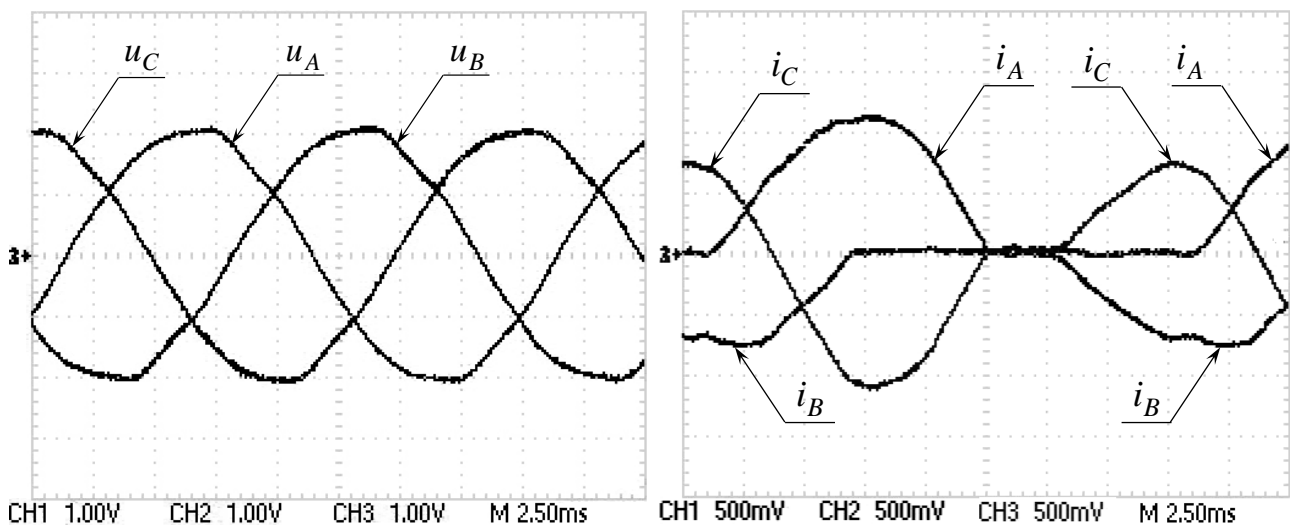


Рисунок 6 – Трехфазные напряжения и токи нелинейной активно-реактивной нагрузки с диодами

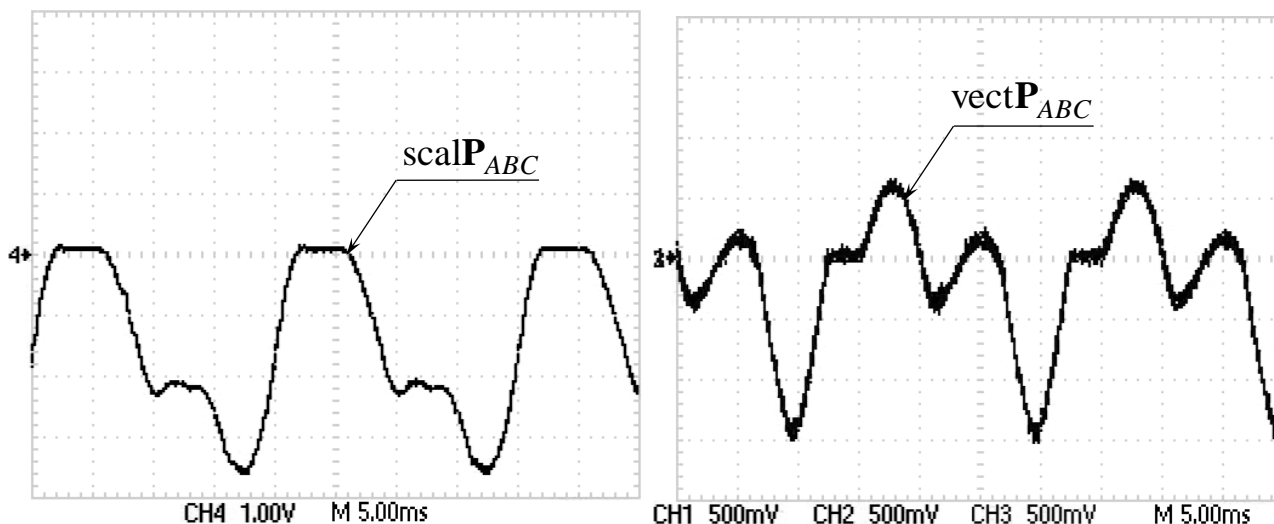


Рисунок 7 – Скалярная и векторная части кватерниона мгновенной мощности трехфазной нагрузки

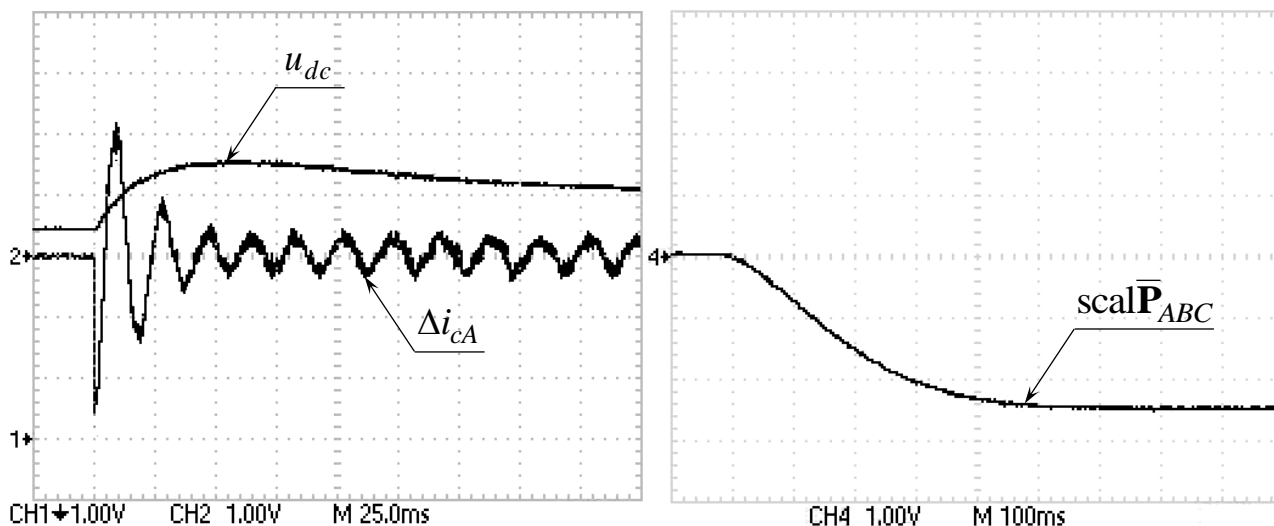


Рисунок 8 – Переходной процесс по напряжению u_{dc} и активному току компенсации Δi_{cA} в фазе А “в малом”

Рисунок 9 – Переходной процесс оценки $scal\bar{P}_{ABC}$ при настройке на фильтр Бесселя второго порядка

В целях проверки правильности результатов синтеза астатического контура регулирования напряжения силового емкостного фильтра C , на рисунке 8 изображена реакция u_{dc} при отработке скачкообразного отклонения $\Delta u_{dc} = 50$ В от стабилизируемого значения $u_{dc}^* = 400$ В при выборе численных значений параметров последовательного корректирующего устройства (48) из следующих равенств

$$T_{крн} = (2\pi \cdot 3,5)^{-1} \text{ с}, \quad \xi_{крн} = \sqrt{3}/2.$$

Для исключения насыщения интегральной составляющей в ПИ-регуляторе **РН** использовалась безынерционная отрицательная обратная связь со статической нелинейностью типа “зона нечувствительности”, интервальная граница которой выбиралась из условия не превышения тока заряда C максимально-допустимого значения.

В свою очередь на рисунке 9 представлен переходной процесс выделения $\text{scal}\bar{P}_{ABC}$ на выходе специальной динамической подсистемы низкочастотной фильтрации второго порядка ФНЧ при настройке ее характеристического полинома вида (47) на стандартную линейную форму Бесселя с $A_1 = \sqrt{3}$ и средне-геометрическим корнем $\Omega = 10 \text{ c}^{-1}$.

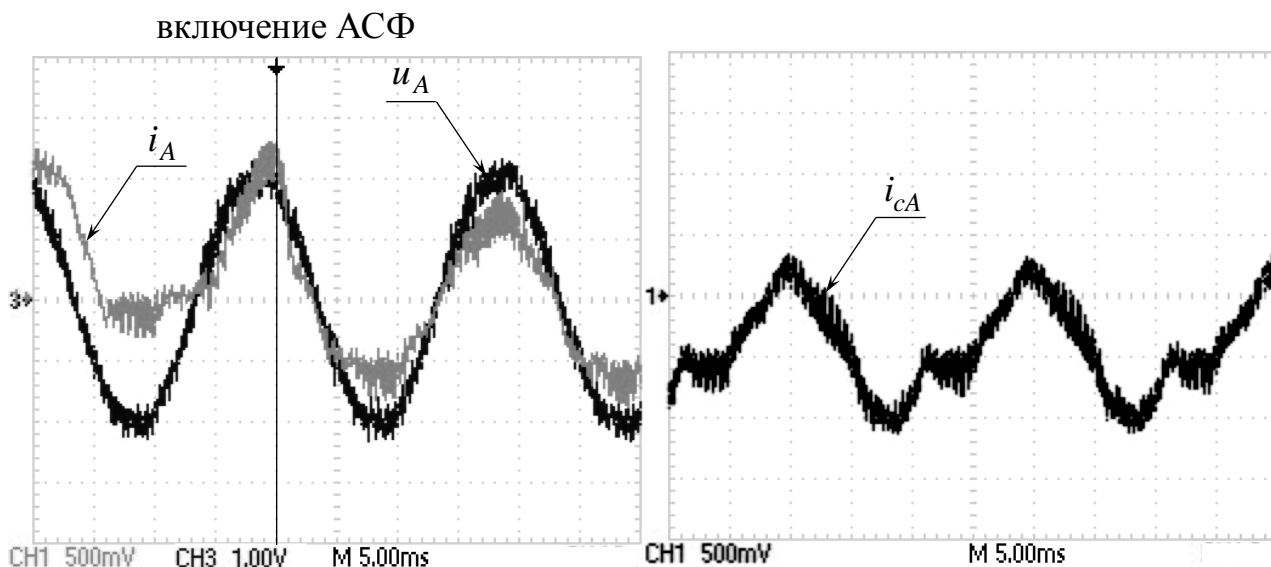


Рисунок 11 – Ток и напряжение фазы А источника до и после момента включения АСФ с алгоритмом активной фильтрации вида (44)

Рисунок 12 – Компенсационный ток фазы А на выходе АСФ с алгоритмом активной фильтрации (44)

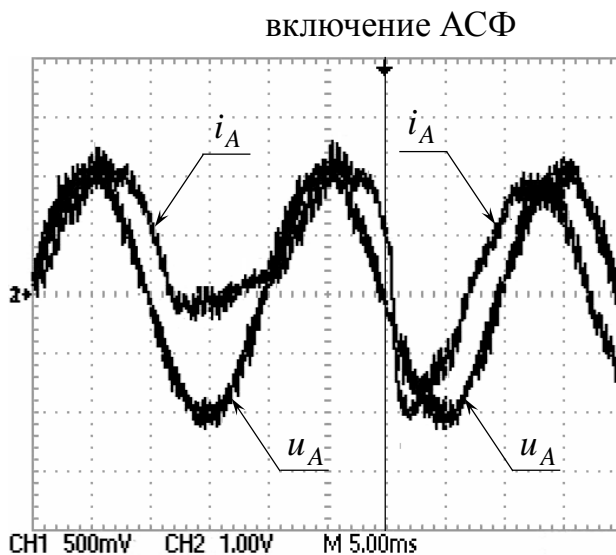


Рисунок 13 – Ток и напряжение фазы А источника до и после момента включения АСФ с алгоритмом компенсации вида (45) при $\varphi = 45^\circ$

На рисунках 11 и 13 изображены потребляемые от источника токи, которые после вступления в работу АСФ с $u_{dc} = 500 \text{ В}$ принимают синусоидальный вид с нулевым или опережающим угловым смещением во всех трех фазах, ве-

личина которого определяется добавочной компонентой $\Delta \text{vect} \bar{\mathbf{P}}_{ABC}$, а на рисунке 12 представлена временная зависимость соответствующего компенсационного воздействия фазы A при $\varphi = 0$, подтверждающие таким образом правильность полученных в ходе диссертационного исследования теоретических результатов.

Как видно из приведенных выше осциллограмм, которые наглядно иллюстрируют принцип действия и эффективность разработанных алгоритмов активной фильтрации в гиперкомплексном пространстве \mathbf{H} , практическое применение АСФ обеспечивает как единичный, так и опережающий коэффициент мощности при гармонической форме потребляемых токов в случае произвольной нелинейной и/или несимметричной нагрузки, что позволяет на практике реализовывать высокоэффективные системы энергосбережения. При этом в данном случае не требуется привлечение высокопроизводительных программно-аппаратных средств, т.к. выработка задающих воздействий \mathbf{I}_c^* в терминах гиперкомплексных чисел осуществляется с меньшим количеством математических операций по отношению к другим методам синтеза, выполненным, например, в рамках исходной или расширенной (видоизмененной) $p-q$ теорий, и без привлечения линейных ортогональных преобразований исходного базиса.

Приложение структурно состоит из двух частей, включающих в себя промежуточные результаты вывода расчетных соотношений для определения текущих значений различных норм кватерниона мгновенной мощности применительно к несимметричным линейным RLC-нагрузкам, а также вещественных коэффициентов \mathbf{P}_{ABC} при произвольных законах изменения фазных напряжений и токов с представлением каждой из гармоник в виде линейной комбинации прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационного исследования был выполнен анализ и синтез трехфазных систем с активными силовыми фильтрами на основе математического описания процесса энергопотребления нагрузками произвольного вида (нелинейными и несимметричными) в гиперкомплексном пространстве \mathbf{H} , которые включает в себя следующие основные результаты.

1. Обобщение классификационных признаков и структурно-алгоритмических принципов построения последовательных, параллельных и последовательно-параллельных АСФ, осуществляющих частичную или полную компенсацию неэффективных (неактивных) составляющих мгновенной мощности.

2. На основании выполненного анализа различных способов математического описания линейных ортогональных преобразований переменных в трехфазных цепях переменного тока, таких как, Clarke Transformation и Park Transformation, получены расчетные соотношения, позволяющие сократить число

используемых кинематических параметров до 4-х в отличие от традиционного подхода с 9-тью элементами матрицы направляющих косинусов.

3. С единых позиций метода пространства состояний и матричного исчисления обобщены различные алгоритмические принципы формирования компенсационных воздействий, базирующиеся на правилах векторной алгебры, с выявлением их достоинств и недостатков.

4. В рамках математического аппарата алгебры кватернионов получены аналитические зависимости для численного расчета мгновенной мощности применительно к различного рода несимметричным и/или нелинейным электрическим цепям при произвольной мгновенной форме сигналов.

5. При помощи сформулированных критериев энергоэффективности трехфазных систем в терминах гиперкомплексных чисел разработаны алгоритмы управления силовыми преобразовательными устройствами, позволяющие исключить из состава потребляемых токов и напряжений источника нулевую и/или обратную последовательности фаз по всем гармоникам при заданном угловом сдвиге.

6. Решена задача о безусловном экстремуме квадратичного функционала, доставляющая максимум нормы кватерниона активных мгновенных токов, техническая реализация которой в идеализированном случае не требует присутствия в силовых цепях компенсации элементов, служащих для хранения и обмена электромагнитной энергией.

7. Разработана инженерная методика синтеза алгоритмов активной фильтрации, обеспечивающая в трехфазной системе с нагрузкой произвольного вида гармоническую форму потребляемых от источника токов с желаемым угловым сдвигом при одновременном соблюдении условия симметрии по мгновенным значениям.

Практическое применение разработанных методик синтеза и структур электротехнических или электромеханических систем переменного тока с силовыми полупроводниковыми преобразовательными устройствами активной фильтрации обеспечат повышение энергоэффективности процессов передачи, распределения и преобразования электрической энергии переменного тока за счет частичной или полной компенсации составляющих мгновенной мощности, обусловленной негативным действием параметрической асимметрии и нелинейности цепей нагрузки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих периодических изданиях.

1. Нос, О. В. Уравнения баланса мощности в математических моделях асинхронного двигателя в различных линейных пространствах / О. В. Нос // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 43–47.

2. Нос, О. В. Математическая модель асинхронного двигателя в линейных пространствах, связанных со статором и ротором / О. В. Нос // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 14–20.

3. Нос, О. В. Анализ различных форм представления кинематических параметров в задачах линейного преобразования трехфазных переменных / О. В. Нос // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 22–28.

4. Нос, О. В. Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел / О. В. Нос, В. В. Панкратов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 33–39.

5. Шалыгин, К. А. Активные силовые фильтры в задачах повышения качества электрической энергии / К. А. Шалыгин, О. В. Нос // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4 (46). – С. 191–202.

6. Нос, О. В. Анализ трехфазных систем компенсации мгновенной неэффективной мощности в кватернионном базисе / О. В. Нос, В. В. Панкратов // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 3–8.

7. Нос, О. В. Алгоритм управления напряжением звена постоянного тока активного силового фильтра / О. В. Нос, В. В. Панкратов, К. А. Шалыгин // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 36–40.

8. Nos, O. V. A voltage-control algorithm for a DC link of an active power filter / O. V. Nos, V. V. Pankratov, K. A. Shalygin // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, № 12. – P. 691–695.

9. Нос, О. В. Гармонический анализ кватерниона мгновенной мощности трехфазной нагрузки произвольного вида / О. В. Нос // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 1 (27). – С. 75–84.

10. Нос, О. В. Система управления силовыми токами компенсации мгновенной неэффективной мощности / О. В. Нос, С. А. Харитонов // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 28–34.

11. Нос, О. В. Аналитическое исследование уравнения мгновенной мощности трехфазной нагрузки в гиперкомплексном пространстве / О. В. Нос // Электричество. – 2015. – № 5. – С. 54–59.

12. Nos, O. V. A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation / O. V. Nos, S. A. Kharitonov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, № 2. – P. 72–78.

13. Нос, О. В. Алгоритмы управления последовательно-параллельными активными силовыми фильтрами / О. В. Нос, Е. С. Кучер, А. В. Бакляк // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 2 (28). – С. 77–87.

Публикации в изданиях, не входящих в перечень ВАК.

14. Нос, О. В. Применение алгебры кватернионов в математических моделях электрических машин переменного тока / О. В. Нос // Автоматизированные электромеханические системы : сб. науч. тр. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – С. 16–32.

15. Нос, О. В. Линейные разложения трехфазных токов по мгновенным значениям / О. В. Нос // Электротехника, электромеханика и электротехнологии : сб. науч. тр. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 29–43.

Публикации по итогам конференций:

16. Нос, О. В. Линейные преобразования векторов и систем координат в математических моделях асинхронного двигателя / О. В. Нос // 9 International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. APEIE–2008 = Материалы 9 международной конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения”. АПЭП–2008, Новосибирск, 2008 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – Т. 7. – С. 104–107.

17. Nos, O. V. Matrix transformations in mathematical models of an induction motor / O. V. Nos // The 9 international conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE–2008, Novosibirsk, 23–25 Sept. 2008 : proceedings. – Novosibirsk, 2008. – Vol. 1. – P. 142–144.

18. Нос, О. В. Математические модели электрических машин переменного тока с использованием спиновых матриц Паули / О. В. Нос // Электротехника, электромеханика и электротехнологии. ЭЭЭ–2009 : материалы 4 науч.-техн. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 23–24 окт. 2009 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – С. 128–134.

19. Нос, О. В. Применение математического аппарата гиперкомплексных чисел при линейном преобразовании типа “вращение” / О. В. Нос // 10 International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. APEIE–2010 = Материалы 10 международной конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения”. АПЭП–2010, Новосибирск, 2010 г. – Новосибирск, 2010. – Т. 7. – С. 46–50.

20. Nos, O. V. Linear transformations in mathematical models of an induction motor by quaternions / O. V. Nos // 13 International conference and seminar of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2012), Altai, Erlagol, 2–6 July 2012. – Novosibirsk, 2012. – P. 295–298.

21. Нос, О. В. Применение углов Эйлера-Крылова при линейном преобразовании базиса фазных переменных / О. В. Нос // Актуальные проблемы электронного приборостроения. (АПЭП–2012) = International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings (APEIE–2012) : материалы 11 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт., 2012 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – Т. 7. – С. 139–142.

22. Нос, О. В. Алгоритмы управления активными силовыми фильтрами при несимметричной нелинейной нагрузке / О. В. Нос, В. В. Панкратов, К. А. Шалыгин // 7 международная (18 Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. АЭП–2012, (Иваново, 2–4 окт. 2012 г.). – Иваново, 2012. – С. 69–74.

23. Нос, О. В. Основные положения P–Q теории мгновенной мощности трехфазных систем / О. В. Нос, К. А. Шалыгин // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : тр. 5 Всерос. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 20–22 нояб. 2012 г. – Новокузнецк : [Издат. центр СибГИУ], 2012. – С. 261–267.

24. Nos, O. V. DC-bus voltage control strategy of active power filter / O. V. Nos, K. A. Shalygin // 14 International conference of young specialists on mi-

cro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2013): proc., Altai, Erlagol, 1–5 July 2013. – P. 345–348.

25. Нос, О. В. Экспериментальное исследование алгоритмов управления активным силовым фильтром с компенсацией мгновенной неэффективной мощности / О. В. Нос, В. В. Панкратов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Серія “Проблеми автоматизированного електроприводу. Теорія і практика” (спец. вип.). – 2013. – № 36 (1009). – С. 431–432.

26. Nos, O. V. Control strategy of active power filter for ineffective instantaneous power compensation / O. V. Nos // 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 Press, 2014. – P. 370–374.

27. Nos, O. V. Control strategy of shunt active power filter based on algebraic approach / O. V. Nos // The 16 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2015) : proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk : IEEE Press, 2015. – P. 459–463.

28. Malyavko E. Y. Control strategy of inactive instantaneous power compensation in quaternion basis / E. Y. Malyavko, O. V. Nos // 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 Press, 2014. – P. 411–414.

29. Нос, О. В. Алгоритмы компенсации мгновенной неактивной мощности с использованием p - q и p - q - r теорий / О. В. Нос // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): тр. 12 междунар. конф. АПЭП-2014, Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 166–170.

30. Нос, О. В. Система управления полупроводниковым устройством компенсации кватерниона мгновенной неэффективной мощности / О. В. Нос // 8 международная (19 Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. АЭП-2014, Саранск, 7–9 окт. 2014 г. В 2 т. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 229–234.

31. Шалыгин, К. А. Техническая реализация принципов энергосбережения на базе активных силовых фильтров / К. А. Шалыгин, О. В. Нос // 8 международная (19 Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. АЭП-2014, Саранск, 7–9 окт. 2014 г. В 2 т. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 28–32.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается:

[4, 13, 22, 23] – постановка задачи и изложение основных теоретических положений.

[5, 28, 31] – постановка задачи и выводы по результатам исследования;

[6–8, 24] – изложение основных теоретических положений, выполнение цифрового моделирования и экспериментальных исследований;

[10, 12, 25] – изложение основных теоретических положений и выполнение экспериментальных исследований.

Подписано в печать 08.09.2015. Формат 60×84¹/₁₆
Бумага офсетная. Тираж 120 экз. Печ. л. 2.5
Заказ № 1245

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20