

Применение вейвлет-преобразования в системе управления активным фильтром гармоник в составе гибридного распределительного трансформатора

В.В. Кижин

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

vadim-hero4ever@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0003-5814-3047>.

Статья поступила 12.01.2026, принята 19.01.2026

Современная электроэнергетика переживает период масштабной трансформации, вызванной повсеместным внедрением силовой электроники. В качестве примера можно отметить широкое распространение зарядных станций для электромобилей. Нелинейный характер потребления тока этими устройствами является основным источником высших гармонических искажений в электрических сетях. Для комплексного решения проблем с качеством электроэнергии могут применяться активные фильтры гармоник, интегрированные в силовые распределительные трансформаторы, образующие более сложные гибридные устройства, позволяющие не только преобразовывать напряжение, но и активно влиять на форму тока, компенсируя гармоники, стабилизируя напряжение и регулируя потоки мощности в электрической сети. В работе представлены результаты исследования эффективности применения гибридного распределительного трансформатора (ГРТ) с различными конфигурациями систем активной фильтрации для компенсации гармонических искажений в распределительных сетях 0,4 кВ. Выполнено сравнительное моделирование в среде MATLAB/Simulink вариантов систем управления активного фильтра гармоник ГРТ: с использованием только вейвлет-фильтра и комбинированной каскадной системы фильтров. Установлено, что последовательное применение вейвлет-преобразования и полосовых фильтров в системе управления ГРТ позволяет достичь максимального снижения суммарного коэффициента нелинейных искажений (THD) до 0,48 %, что в 11,7 раз меньше, чем при использовании обычного силового трансформатора и в 3,8 раза ниже, чем при использовании одиночного вейвлет-фильтра. Показана эффективность временно-частотного анализа для работы в условиях нестационарных нагрузок. Полученные результаты подтверждают перспективность использования гибридных трансформаторов с усовершенствованными алгоритмами управления для обеспечения качества электроэнергии в сетях с преобладанием нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: гибридный распределительный трансформатор; зарядная станция электромобилей; вейвлет-преобразование; качество электроэнергии; компенсация гармоник; имитационное моделирование.

Application of wavelet transform in the control system of active harmonic filter in hybrid distribution transformer

V.V. Kizhin

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

vadim-hero4ever@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0003-5814-3047>.

Received 12.01.2025, accepted 19.01.2026

The modern electric power industry is undergoing a period of large-scale transformation caused by the widespread adoption of power electronics. A notable example is the widespread use of electric vehicle charging stations. The nonlinear nature of current consumption by these devices is the primary source of harmonic distortion in electrical grids. To comprehensively address power quality issues, active harmonic filters integrated into power distribution transformers can be used. These filters form more complex hybrid devices that not only convert voltage but also actively influence the current waveform, compensating for harmonics, stabilizing voltage, and regulating power flows in the grid. This paper presents the results of a study examining the effectiveness of a hybrid distribution transformer (HDT) with various active filtering system configurations for harmonic distortion compensation in 0,4 kV distribution networks. A comparative simulation in MATLAB/Simulink is performed for various active harmonic filter control systems for HDTs: one using only a wavelet filter and another using a combined cascade filter system. It is found that the sequential use of a wavelet transform and bandpass filters in a HDT control system enables a maximum reduction in total harmonic distortion (THD) to 0,48 %, which is 11,7 times lower than that achieved with a conventional power transformer and 3,8 times lower than that achieved with a single wavelet filter. The effectiveness of time-frequency analysis for operation under transient load conditions is demonstrated. The obtained results confirm the potential of using hybrid transformers with advanced control algorithms to ensure power quality in networks with predominantly nonlinear loads.

Keywords: hybrid distribution transformer; electric vehicle charging station; wavelet transform; power quality; harmonic compensation; simulation modeling.

Введение. Современная электроэнергетика переживает период масштабной трансформации, вызванной повсеместным внедрением современной силовой электроники. С одной стороны, силовые полупроводниковые устройства позволяют создавать высокоэффективные и управляемые системы, такие как частотные приводы, импульсные источники питания, выпрямители и инверторы [1]. С другой стороны, их нелинейный характер потребления тока является основным источником высших гармонических искажений. В то же время массовый переход на электромобили приводит к появлению огромного количества мощных нелинейных нагрузок, вызванных зарядными станциями [2, 3]. Такие зарядные устройства представляют собой мощные выпрямители, которые потребляют ток короткими импульсами, генерируя гармоники различной амплитуды.

Согласно положениям [4, 5], идеальная форма кривой напряжения и тока в электрической сети является синусоидальной и должна содержать единственную составляющую, в Российской Федерации, как и в большинстве стран это 50 Гц, что в свою очередь является основной гармоникой промышленной частоты. Любое отклонение от эталонной синусоидальной формы может быть математически аппроксимировано с помощью ряда Фурье в виде суммы гармонических составляющих с частотами, кратными основной.

При наличии в электрической сети нелинейной нагрузки искажается форма тока и напряжения. В спектральном разложении такого искажённого сигнала, наряду с основной гармоникой, присутствует значительный набор высших гармоник [6].

Особую актуальность данная проблема приобретает в контексте стремительного распространения мощных энергопотребляющих объектов, таких как электрические заправочные станции. Мощность единичной станции быстрой зарядки постоянного тока (DC Fast Charging) достигает 150–350 кВт, а ультрабыстрой (Ultra-fast Charging) – 400 кВт и выше [7]. Столь концентрированная и импульсная нагрузка, связанная с процессами выпрямления переменного тока, приводит к масштабным высокоуровневым выбросам в сеть не только характерных низкочастотных гармоник (5-й, 7-й, 11-й, 13-й), но и широкого спектра высших гармоник, вплоть до 50-й и выше, а также интергармоник, возникающих из-за модуляционных процессов в преобразовательной технике [8]. Подобная интенсивная и быстрая трансформация электрических сетей и растущая доля нелинейных нагрузок в общем балансе мощности приводит к тому, что уровень гармоник достигает критических значений, требуя разработки более эффективных и быстродействующих методов их компенсации.

Для борьбы с гармониками традиционно применяются два основных типа фильтров: пассивный LC-фильтр, состоящий из катушки индуктивности (L) и конденсатора (C), образующих последовательный или параллельный колебательный контур, и активный фильтр. Пассивный фильтр настраивается на частоту определённой гармоники, так, чтобы на выбранной резонансной частоте полное сопротивление контура становилось минимальным, создавая для токов этой гармоники путь с низким сопротивлением, шунтирующую ветвь, тем самым, не позволяя им протекать в электрическую сеть [9].

Пассивные фильтры имеют ряд преимуществ, такие как отсутствие активных электронных компонентов и сложных систем управления, но при этом, имеется и ряд недостатков в виде фиксированной компенсации конкретных гармоник и резонанса с импедансом электрической сети, что может привести к росту искажений, вплоть до повреждения оборудования. Такой фильтр – хорошее решение для стационарных, предсказуемых нагрузок с постоянным спектром гармоник, но в современных электрических сетях с динамично меняющимися нагрузками их применение рискованно и часто недостаточно.

Активные фильтры (АФ) используют методы интеллектуальной и адаптивной компенсации, реализуя работу по принципу противофаз. Система управления АФ в реальном времени измеряет ток нелинейной нагрузки, и зачастую с помощью алгоритмов мгновенной мощности $p-q$ или в координатах $d-q$ она выделяет из этого тока гармоническую составляющую [10]. После АФ создаёт компенсирующий ток гармоник, фаза которого развёрнута на 180 градусов относительно тока нагрузки. Далее сгенерированный ток подводится в точку подключения нагрузки, в результате чего, если компенсация идеальна, в сети остается только основная гармоника. Такие АФ способны динамически отслеживать изменения спектра гармоник и мгновенно подстраиваться под них.

Для комплексного решения проблем с качеством электроэнергии АФ часто интегрируются в более сложные устройства. Одной из таких интеграций является гибридный распределительный трансформатор (ГРТ) [11–13], представляющий устройство, сочетающее в себе классический трансформатор и активный силовой преобразователь, включенный последовательно или параллельно. Это позволяет не только преобразовывать напряжение, но и активно влиять на форму тока, компенсируя гармоники, стабилизируя напряжение и регулируя перетоки мощности. Интеграция АФ в структуру ГРТ представляет собой мощный инструмент для обеспечения качества электроэнергии. Параллельное подключение активной части, позволяет компенсировать гармоники тока и реактивную мощность. Интегрированная система управления координирует работу обеих частей, что позволяет ГРТ решать комплекс задач, среди которых компенсация гармоник тока и напряжения, стабилизация напряжения на выходе независимо от колебаний во входной сети. Это делает ГРТ идеальным решением для узловых точек современных распределительных сетей, таких как вводы промышленных предприятий или мощных зарядных кластеров [14–16].

Ключевым элементом любого ГРТ является его система управления, точность и быстродействие которой в итоге определяют общую эффективность компенсации. В основе большинства современных систем управления активными фильтрами лежат классические методы анализа гармоник, быстрое преобразование Фурье (БПФ) и синхронное $d-q$ преобразование [17, 18]. Метод БПФ позволяет с высокой точностью разложить сигнал на спектральные составляющие, определив амплитуду и фазу каждой гармоники. Однако его фундаментальным недостатком является отсутствие временной локализации. БПФ способно показать, какие гармоники присутствуют в анализируемом временном окне, но не показывает, когда именно они возникли или изменились.

В целях повышения эффективности и преодоления ограничений, присущих классическим методам перспективной альтернативой выступает вейвлет-преобразование [19–21]. Его фундаментальное преимущество перед БПФ заключается в реализации совместного временного и частотного анализа нестационарных сигналов. Ключевой принцип метода заключается в масштабировании и сдвиге вейвлета, что позволяет анализировать сигнал на различных частотных диапазонах с соответствующим временным разрешением. Высокочастотные компоненты исследуются сжатыми вейвлетами для точной временной локализации, а низкочастотные – растянутыми вейвлетами, для корректного определения спектрального состава.

Данный подход обеспечивает возможность точной временной локализации момента возникновения, оценки длительности и идентификации характера переходных процессов и нестационарных искажений, что является критически важным для задач управления в динамически изменяющихся электрических системах [22].

Указанные свойства обуславливают необходимость применения вейвлет-преобразования в системах управления ГРТ (активных фильтров гармоник), функционирующих в условиях современных распределительных сетей, характеризующихся значительной долей нелинейных и стохастических нагрузок.

Целью данной работы является реализация алгоритмов управления на основе вейвлет-преобразования для активного фильтра гармоник ГРТ и анализ эффективности работы предлагаемой системы со стороны компенсации гармонических искажений. Для оценки эффективности использовались гистограммы гармоник тока и величина суммарного гармонического искажения (THD).

Методология исследования и конфигурация моделируемой системы. Моделирование динамических процессов осуществлялось в среде MATLAB/Simulink. Показанная на рис. 1 конфигурация ГРТ представляет собой структуру, состоящую из пассивной и активной частей.

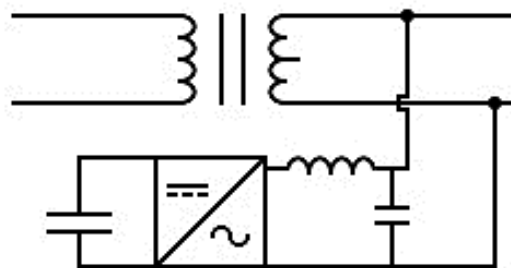


Рис. 1. Конфигурация рассматриваемого ГРТ

Пассивная часть представляет собой силовой трансформатор, выполняющий функцию гальванической развязки и базового преобразования напряжения.

Активная часть состоит из силового преобразователя, представляющего собой двунаправленный преобразователь AC/DC, подключенный ко вторичной обмотке силового трансформатора через пассивный LC-фильтр, и ёмкостного элемента на стороне постоянного тока (конденсатор C), выполняющего функции накопления энергии для генерации компенсирующих токов и обеспечения баланса мгновенной мощности между входом и выходом преобразователя.

Принцип действия представленной системы ГРТ основан на непрерывном мониторинге токов нагрузки и выделении их гармонических составляющих с последующей генерацией инвертором компенсирующих токов, поступающих в сеть через LC-фильтр. Наличие ёмкости в звене постоянного тока (DC) обеспечивает необходимый энергетический буфер для эффективной генерации компенсирующих сигналов произвольной формы.

На рис. 2 представлена разработанная в MATLAB / Simulink схема, реализующая классическую систему управления АФ с использованием синхронного dq0-преобразования. Данная архитектура включает несколько ключевых функциональных блоков, образующих замкнутую систему управления.

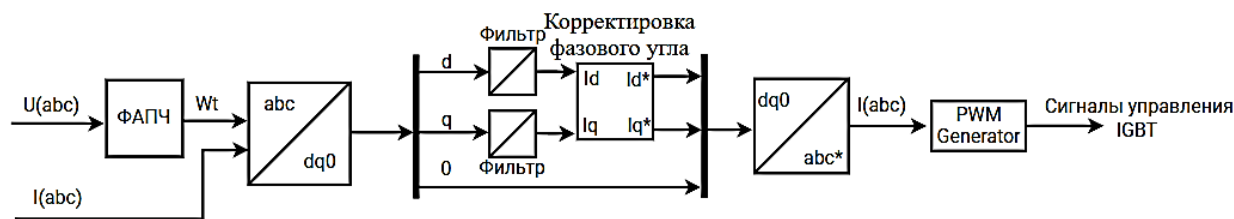


Рис. 2. Схема системы управления преобразователем

Основу системы составляет блок координатных преобразований, выполняющий переход из трёхфазной системы координат a-b-c в синхронно-вращающуюся систему координат d-q-0. Данное преобразование позволяет выделить постоянные составляющие токов в осях d и q. Частота преобразования определяется с помощью блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Важнейшим элементом системы является блок фильтрации, который реализует выделение переменных составляющих токов в осях d и q. Для этой цели может использоваться полосовой фильтр. Особую роль играет блок коррекции фазового угла, выполняющий инверсию

фазового угла выделенных составляющих тока. Завершающим этапом обработки сигналов служит блок обратного преобразования координат, который трансформирует компенсирующие сигналы из системы d-q-0 обратно в трёхфазную систему a-b-c, формируя эталонные сигналы для последующей модуляции.

Ключевыми преимуществами данной структуры управления являются высокая точность выделения гармоник, эффективное подавление гармонических составляющих, устойчивость к изменениям сетевой частоты, а также возможность независимого управления активной и реактивной мощностью.

Схема моделируемого фрагмента электрической сети, для которой проводились исследования по эффективности рассматриваемой системы управления активным фильтром гармоник ГРТ, приведена на рис. 3. В её состав входят: трёхфазный источник питания напряжением 6,3 кВ; гибридный трансформатор с системой

управления (СУ) активного фильтра гармоник; трёхфазная стационарная нагрузка на стороне 0,4 кВ мощностью $1 + j0,25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; зарядная станция (ЗС) электромобилей мощностью 300 кВт, которая выступает в роли нелинейной нагрузки, генерирующей в сеть высшие гармонические составляющие тока.

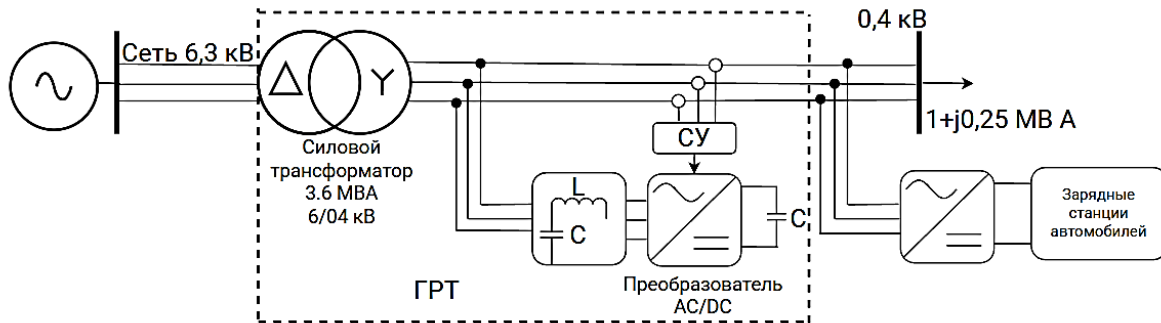


Рис. 3. Схема моделируемой электрической сети

Моделирование СУ ГРТ на основе вейвлет-преобразования. Моделирование рассматриваемой системы управления ГРТ, основанной на применении вейвлет-преобразования, реализовано вместо полосового фильтра, указанного на рис. 2, блоком "MATLAB Function", обеспечивающим выполнение алгоритмических функций пользователя [23]. В структуре данного блока предусмотрена обработка входных и обратных сигналов системы с использованием стационарного дискретного вейвлет-преобразования (SWT) [24], что позволяет осуществлять их многоуровневую декомпозицию без потери временного разрешения.

Алгоритм работы системы управления на основе вейвлет-преобразования состоит из следующих этапов:

1. Инициализация параметров вейвлет-анализа: определение глубины декомпозиции (S); задание длины буфера анализа (N); выбор вейвлет-фильтра (LoD).
2. Циклическая обработка сигналов в реальном времени: буферизация входных сигналов в осях d, q, 0; проверка полученных параметров.
3. Последовательное применение SWT-фильтрации.
4. Многоуровневая вейвлет-декомпозиция: циклическое применение фильтра низких частот; симметричное дополнение границ сигнала; свертка с вейвлет-фильтром.
5. Итеративная обработка на S уровнях разложения.
6. Анализ вейвлет-коэффициентов: выделение аппроксимирующих компонентов; адаптивная коррекция параметров.

Таким образом, представленный алгоритм СУ ГРТ реализует стационарное вейвлет-преобразование (SWT), которое сохраняет длину сигнала на каждом уровне разложения, что важно для обработки в реальном времени. Используемый в блоке "MATLAB Function" код реализует специализированный алгоритм вейвлет-фильтрации сигналов в синхронно вращающейся системе координат, который был реализован в специализированной

программе [23]. Ключевой особенностью является использование стационарного вейвлет-преобразования, которое, в отличие от классического, сохраняет временное разрешение за счёт отказа от операции децимации. Это обеспечивает возможность точного отслеживания динамических процессов в реальном времени.

Методика предлагаемого вейвлет-преобразования осуществляет декомпозицию исходного сигнала на аппроксимирующие низкочастотные и детализирующие высокочастотные компоненты, каждая из которых соответствует определённому частотному диапазону. Поскольку гармонические искажения сосредоточены преимущественно в полосах, отличных от основной частоты, данное свойство позволяет целенаправленно выделять и подавлять нежелательные спектральные составляющие. Особенностью подхода является возможность сохранения корректности воспроизведения фундаментального сигнала за счёт селективной обработки только детализирующих коэффициентов, содержащих информацию о гармонических составляющих.

Полученные вейвлет-коэффициенты на каждом уровне анализа используются как для адаптивной корректировки параметров регуляторов в реальном времени, так и для формирования управляющих воздействий, учитывающих текущее динамическое состояние системы. Это обеспечивает возможность реализации предиктивного управления с компенсацией гармонических искажений на ранних стадиях их возникновения.

Фрагмент исследуемой схемы электрической сети в MATLAB с СУ на основе вейвлет-преобразования представлен на рис. 4.

На рис. 5 представлены результаты сравнительного анализа гармонического спектра токов в сети 0,4 кВ при использовании двух конфигураций: традиционного силового трансформатора 6/0,4 кВ и гибридного трансформатора с системой управления на основе вейвлет-преобразования.

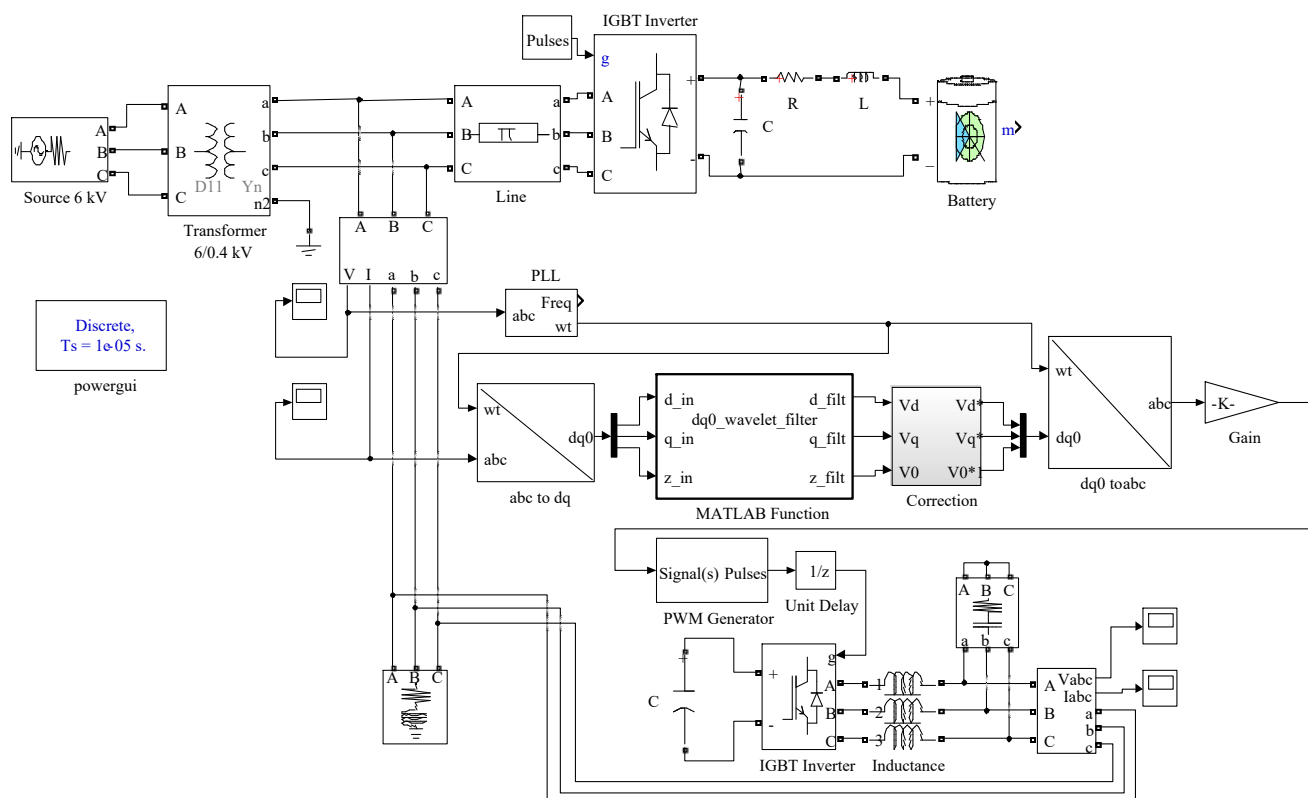


Рис. 4. Фрагмент исследуемой схемы электрической сети в MATLAB

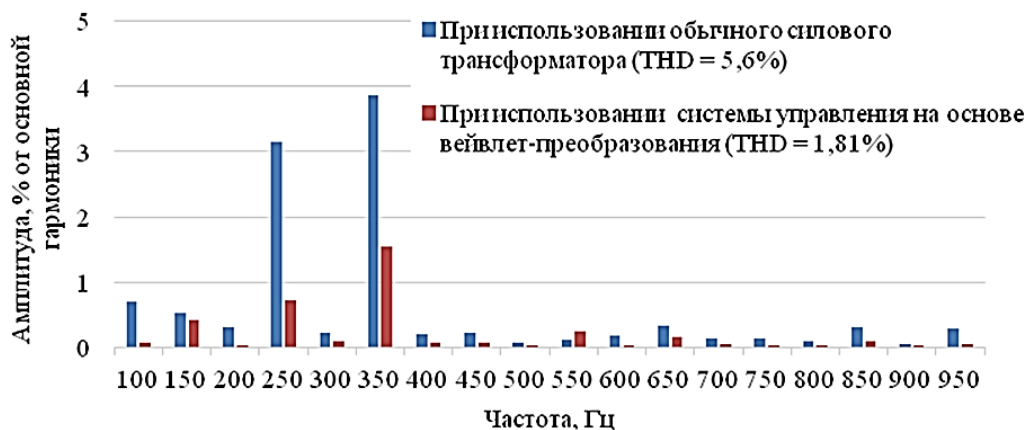


Рис. 5. Гистограммы гармоник токов

Как видно из гистограммы рис. 5, THD токов снижен до 1,8 % при 5,6 % у обычного трансформатора, что более чем в 3 раза улучшило качество электроэнергии у потребителя. Наблюдается равномерное и глубокое подавление гармонических составляющих во всём частотном диапазоне, включая высшие гармоники (выше 15-го порядка), где традиционные методы часто теряют эффективность. Это подтверждает работоспособность предлагаемой СУ на основе вейвлет-преобразования и точность выделения и компенсации гармоник.

Результаты моделирования СУ ГРТ на основе каскадной системы фильтров. Вейвлет-преобразование и полосовая фильтрация действуют на различных принципах, в связи с чем способны обеспечить различные способы фильтрации и дать синергетический эффект, значительно улучшающий качество очистки сигнала

благодаря реализации многоступенчатой стратегии обработки. Рассмотрим основные аспекты такого подхода.

Вейвлет-анализ обеспечивает временно-частотную локализацию с адаптивным разрешением; при этом полосовой фильтр способен реализовать точное частотное подавление в заданных диапазонах. Многоуровневая стратегия подавления шумов реализована ступенчато:

1. Первая ступень вейвлет-фильтрации: выполняет предварительную сегментацию сигнала на частотные поддиапазоны; эффективно подавляет импульсные помехи и нестационарные искажения; обеспечивает грубую фильтрацию с сохранением временной структуры сигнала.

2. Вторая ступень полосовой фильтрации: точная настройка на подавление конкретных гармонических составляющих; обеспечение равномерного подавления

в заданной полосе частот; компенсация возможных артефактов вейвлет-преобразования.

Предлагаемая схема фильтрации сигналов способна устранить недостатки отдельных методов, эффекта Гиббса на границах резких изменений сигнала и погрешности при восстановлении в областях с низким отношением сигнал-шум, которые присутствуют при применении вейвлет-фильтрации.

Схема предлагаемой СУ ГРТ, реализованная каскадом фильтров, представлена на рис. 6.

На рис. 7 приведены результаты моделирования в форме гистограммы токов при использовании обычного силового трансформатора и ГРТ с применением каскада фильтров на основе вейвлет-преобразования. Как видно по результатам моделирования из рис. 7, кас-

кадная структура СУ обеспечивает улучшенное подавление внеполосных составляющих, повышает точность выделения гармонических составляющих и значительно улучшает качество компенсирующего сигнала. При последовательном применении вейвлет-преобразования и полосового фильтра величина THD тока снизилась с 5,6 % до 0,48 %, что в 11,7 раза лучше, чем при использовании обычного трансформатора, и в 3,8 раза лучше, чем при использовании одиночного вейвлет-фильтра (см. рис. 5). Каскадная структура обеспечивает глубокое подавление высших гармоник и снижение амплитуд гармонических составляющих до уровня 0,1–0,3 % во всём частотном диапазоне, включая критичные 5-ю и 7-ю гармоники. Достигнутый уровень THD = 0,48 % с запасом превосходит требования стандарта (THD < 5 %).

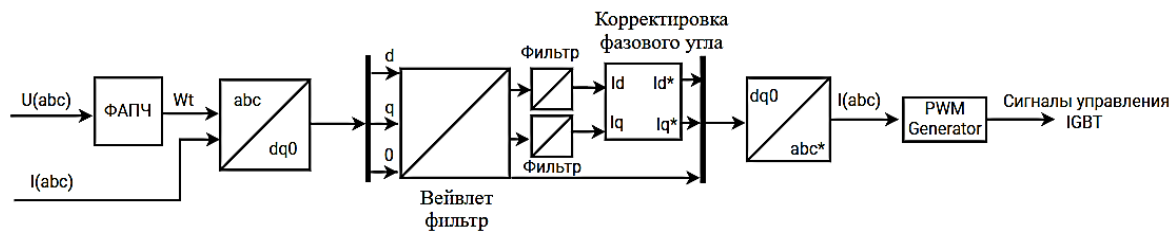


Рис. 6. Схема системы управления преобразователем, реализованная каскадом фильтров

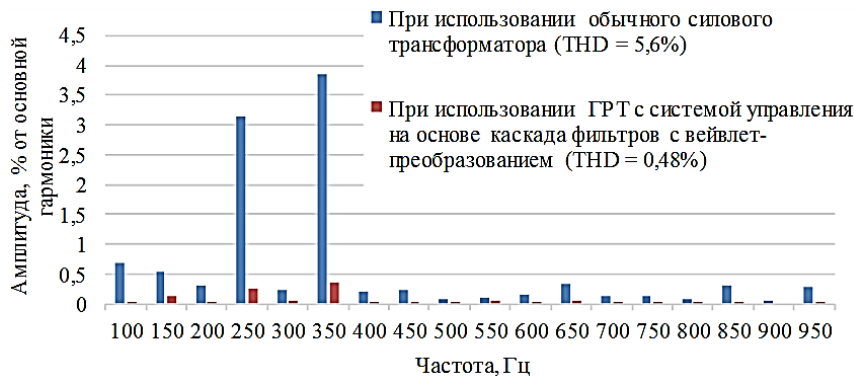


Рис. 7. Гистограммы гармоник токов в электрической сети

Ниже приведены результаты работы моделируемой каскадной системы фильтров СУ ГРТ на основе вейвлет-преобразования и полосового фильтра при динамическом увеличении нагрузки зарядной станции электромобилей. Результаты моделирования, представ-

ленные на рис. 8 в виде изменяющейся во времени величины THD тока, демонстрируют эффективность каскадной системы управления ГРТ в условиях динамически изменяющейся нагрузки от зарядной станции электромобилей.

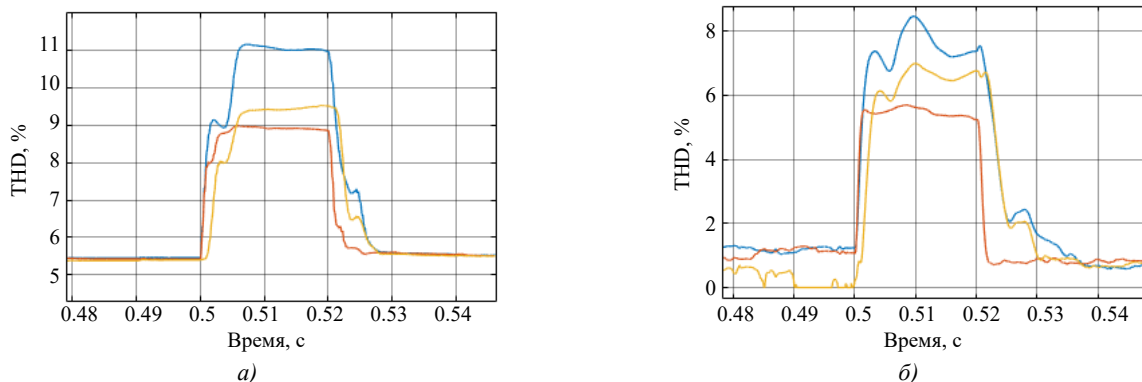


Рис. 8. Графики величины THD токов у потребителя электроэнергии: а – обычный силовой трансформатор; б – ГРТ с СУ на основе каскада фильтров с вейвлет-преобразованием

Проанализировав графики величин THD, следует отметить реакцию системы на скачкообразное временное увеличение нагрузки зарядной станции: предлагаемая СУ демонстрирует быстрый отклик на изменение режима; при этом качество компенсации в переходных режимах значительно улучшается, а уровень THD тока не превышает 8,1 % даже в момент максимального броска тока в отличие от схемы без ГРТ, где уровень THD поднимается выше 11 %.

Заключение. Выполненное имитационное моделирование и полученные результаты подтверждают, что реализованная система управления ГРТ на основе каскада фильтров обеспечивает соответствие требованиям стандартов качества электроэнергии (THD < 5 %) и может быть рекомендована для применения в распределительных сетях 0,4 кВ с нелинейными нагрузками.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Использование вейвлет-фильтрации в системе управления ГРТ позволило подавить гармонические составляющие тока во всём частотном диапазоне. Величина THD токов снижена до 1,8 %, что более чем в 3 раза улучшило качество электроэнергии у потребителя по

сравнению с обычным силовым трансформатором без фильтра гармоник.

2. Каскадная структура СУ ГРТ обеспечивает улучшенное подавление гармоник тока. При последовательном применении вейвлет-преобразования и полосового фильтра величина THD тока снизилась с 5,6 % до 0,48 %, что в 11,7 раза лучше, чем при использовании обычного трансформатора, и в 3,8 раза лучше, чем при использовании одиночного вейвлет-фильтра.

3. Наблюдается достаточная эффективность каскадной системы управления ГРТ в условиях динамически изменяющейся нелинейной нагрузки. Предлагаемая СУ демонстрирует быстрый отклик на изменение режима; при этом качество компенсации в переходных режимах значительно улучшается, а уровень THD тока не превышает 8,1 % даже в момент максимального броска тока.

4. Изменение конфигурации системы управления активного фильтра гармоник и настройки её параметров дают возможность оптимизировать работу ГРТ. Это предполагает проведение дальнейших исследований, направленных на поиск оптимальных соотношений между качеством компенсации, быстродействием системы и экономической эффективностью реализации.

Литература

1. B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra "A review of active filters for power quality improvement" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, Oct. 1999, doi: 10.1109/41.793345.
2. S. Rahman, I.A. Khan and M.H. Amini "A Review on Impact Analysis of Electric Vehicle Charging on Power Distribution Systems" 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Bangkok, Thailand, 2020, pp. 420–425, doi: 10.1109/SPIES48661.2020.9243118.
3. V.H. Raj, M.S.S. Reddy, H.P. Thethi, G. Ramesh, Q. Mohammad and M. Bhavana "Impact Assessment and Mitigation Strategies for Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks: A Probabilistic Approach" 2024 7th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Greater Noida, India, 2024, pp. 633–637, doi: 10.1109/IC3I61595.2024.10828863.
4. IEEE Std 519–2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. 115 p.
5. ГОСТ 32144-2013. Качество электрической энергии. Общие положения. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 24 с.
6. B. Singh, B.N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey and D.P. Kothari "A review of three-phase improved power quality AC-DC converters" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 3, pp. 641–660, June 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.825341.
7. H. Ma, J. Gu, T.Li, Q. Zhang, Z. Yu and F. Liu "Impact and Analysis of Electric Vehicle Charging and Discharging on Distribution Network Power Quality Based on Synchronized Waveform" 2024 4th Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2024, pp. 447–451, doi: 10.1109/PSGEC62376.2024.10721085.
8. T.H. Ortmeier and C.L. Bradley "Inverter performance and derating for general three phase loads" 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, USA, 2000, pp. 1041–1046 vol. 2, doi: 10.1109/PESS.2000.867517.
9. J.C. Das "Passive filters – potentialities and limitations" in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 1, pp. 232–241, Jan.-Feb. 2004, doi: 10.1109/TIA.2003.821666.
10. B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra "A review of active filters for power quality improvement" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, Oct. 1999, doi: 10.1109/41.793345.
11. V.R.R.S and M.L.N "Implementation of Hybrid Active Power Filter for Power Factor Improvement" 2025 9th International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, India, 2025, pp. 1851–1855, doi: 10.1109/ICISC65841.2025.11187996.
12. R. Kondo, Y. Akagi "Transformerless Hybrid Filter for High-Voltage Motor Drives Compliant with Power Supply Harmonic Regulations" Transactions on Industrial Applications, IEEJ, Vol. 129, No. 9, 2009, pp. 899–906.
13. M.Y. Haj-Maharsi, L. Tang, R. Gutierrez, and S. Bala "Hybrid distribution transformer with AC & DC power capabilities" U.S. Patent, 0 201 338, Aug. 12, 2010.
14. Кижин В.В. Использование гибридного трансформатора для компенсации гармонических искажений в электрической сети с зарядными станциями электромобилей // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2024. – Т. 1. – С. 184–188.
15. Булатов Ю.Н., Кижин В.В. Исследование работы гибридного трансформатора в системе электроснабжения с низким качеством электроэнергии // Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики: Всероссийская школа молодых ученых: сборник науч. тр., Севастополь, 29–30 мая 2024 года. Севастопольский государственный университет, 2024. – С. 59–65.
16. Булатов Ю.Н., Кижин В.В. Применение гибридного трансформатора для компенсации гармонического искажения напряжения в электрической сети с зарядными станциями электромобилей // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты: Мат-лы междунар. науч.-практ. on-line конф. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2024. С. 20–27.
17. D. Gallo, R. Langella and A. Testa "Desynchronized Processing technique for Harmonic and interharmonic analysis" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 3, pp. 993–1001, July 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.829941.

18. Leda, Jeremias. (2010). Fast Fourier Transform For Extracting Frequencies Component Of Power System Harmonics. *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Masyarakat*. 9. 26–36.
19. Московский С.Б., Сергеев А.Н., Лалина Н.А. Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования // *Universum: технические науки*. 2015. №2 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ochistka--signala-ot-shumov-s-ispolzovaniem-veyvlet-preobrazovaniya> (дата обращения: 14.11.2025).
20. Polat Dautov, Cigdem & Ozerdem, Mehmet. (2018). Wavelet transform and signal denoising using Wavelet method. 1–4. 10.1109/SIU.2018.8404418.
21. Lu, J. "Signal recovery and noise reduction with wavelets", PhD. Dissertation, Dartmouth College, 1993
22. Taranenko Yu. (2021). Efficiency of Using Wavelet Transforms for Filtering Noise in the Signals of Measuring Transducers. *Measurement Techniques*. 64. 10.1007/s11018–021–01902–8.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025690377. WAVELET FILTER / В.В. Кижин, Ю.Н. Булатов. – Опубл. 06.11.2025.
24. R. Madan, S.K. Singh, and N. Jain "Signal Filtering Using Discrete Wavelet Transform" vol. 2, no. 3, p. 4, 2009.
9. J.C. Das "Passive filters – potentialities and limitations" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 232–241, Jan.-Feb. 2004, doi: 10.1109/TIA.2003.821666.
10. B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra "A review of active filters for power quality improvement" in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, Oct. 1999, doi: 10.1109/41.793345.
11. V.R.R.S and M.L.N. "Implementation of Hybrid Active Power Filter for Power Factor Improvement" 2025 9th International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, India, 2025, pp. 1851–1855, doi: 10.1109/ICISC65841.2025.11187996.
12. Kondo, Ryota & Akagi, Hirofumi. (2009). A Transformerless Hybrid Active Filter Capable of Complying with Harmonic Guidelines for Medium-Voltage Motor Drives. *IEEJ Transactions on Industry Applications*. 129. 899–906. 10.1541/ieejias.129.899.
13. M.Y. Haj-Maharsi, L. Tang, R. Gutierrez, and S. Bala "Hybrid distribution transformer with AC & DC power capabilities" U.S. Patent, 0 201 338, Aug. 12, 2010.
14. Kizhin V.V. Using a hybrid transformer to compensate for harmonic distortions in an electrical network with electric vehicle charging stations / V.V. Kizhin // *Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences*. – 2024. Vol. 1. P. 184–188.
15. Bulatov Yu.N. Study of the operation of a hybrid transformer in a power supply system with low power quality / Yu.N. Bulatov, V.V. Kizhin // *Digitalization, decarbonization and decentralization of the modern electric power industry: All-Russian school of young scientists: collection of scientific papers*, Sevastopol, May 29–30, 2024. – Sevastopol: Sevastopol State University, 2024. P. 59–65.
16. Bulatov Yu.N. Application of a hybrid transformer to compensate for harmonic voltage distortion in an electric network with charging stations for electric vehicles / Yu.N. Bulatov, V.V. Kizhin // *Electric networks: reliability, safety, energy saving and economic aspects: Proceedings of the international scientific and practical on-line conference*, Kazan, 2024. Kazan : Kazan State Power Engineering University, 2024. P. 20–27.
17. D. Gallo, R. Langella and A. Testa "Desynchronized Processing technique for Harmonic and interharmonic analysis" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 993–1001, July 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.829941.
18. Leda, Jeremias. (2010). Fast Fourier Transform For Extracting Frequencies Component Of Power System Harmonics. *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Masyarakat*. 9. 26–36.
19. Moskovsky Sergey Borisovich, Sergeev Alexander Nikolaevich, Lalina Nina Alekseevna Signal cleaning from noise using wavelet transform // *Universum: technical sciences*. 2015. No. 2 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ochistka-signala-ot-shumov-s-ispolzovaniem-veyvlet-preobrazovaniya> (date of access: 11/14/2025).
20. Polat Dautov, Cigdem & Ozerdem, Mehmet. (2018). Wavelet transform and signal denoising using Wavelet method. 1–4. 10.1109/SIU.2018.8404418.
21. Lu, J. "Signal recovery and noise reduction with wavelets", PhD. Dissertation, Dartmouth College, 1993
22. Taranenko Yu. (2021). Efficiency of Using Wavelet Transforms for Filtering Noise in the Signals of Measuring Transducers. *Measurement Techniques*. 64. 10.1007/s11018–021–01902–8.
23. Certificate of state registration of the computer program No. 2025690377. WAVELET FILTER / V.V. Kizhin, Yu.N. Bulatov – Publ. 06.11.2025.
24. R. Madan, S.K. Singh, and N. Jain. "Signal Filtering Using Discrete Wavelet Transform" vol. 2, no. 3, p. 4, 2009.

References

1. B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra "A review of active filters for power quality improvement" in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, Oct. 1999, doi: 10.1109/41.793345.
2. S. Rahman, I. A. Khan and M.H. Amini "A Review on Impact Analysis of Electric Vehicle Charging on Power Distribution Systems" 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Bangkok, Thailand, 2020, pp. 420–425, doi: 10.1109/SPIES48661.2020.9243118.
3. V.H. Raj, M.S.S. Reddy, H.P. Thethi, G. Ramesh, Q. Mohammad and M. Bhavana "Impact Assessment and Mitigation Strategies for Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks: A Probabilistic Approach" 2024 7th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Greater Noida, India, 2024, pp. 633–637, doi: 10.1109/IC3I61595.2024.10828863.
4. IEEE Std 519–2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. – 115 p.
5. GOST 32144–2013. Quality of electrical energy. General provisions. – Introduced on 01/07/2014. – Moscow : Standartinform, 2014. – 24 p.
6. B. Singh, B.N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey and D.P. Kothari, "A review of three-phase improved power quality AC–DC converters" in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 3, pp. 641–660, June 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.825341.
7. H.Ma, J. Gu, T. Li, Q. Zhang, Z. Yu and F. Liu "Impact and Analysis of Electric Vehicle Charging and Discharging on Distribution Network Power Quality Based on Synchronized Waveform" 2024 4th Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2024, pp. 447–451, doi: 10.1109/PSGEC62376.2024.10721085.
8. T.H. Ortmeier and C.L. Bradley "Inverter performance and derating for general three phase loads" 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), Seattle, WA, USA, 2000, pp. 1041–1046 vol. 2, doi: 10.1109/PESS.2000.867517.