

Научная статья

УДК 621.316

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-21-31

Леонова Юлия Юрьевна, Негадаев Владислав Александрович

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: nva.eav@kuzstu.ru

АНАЛИЗ И ВЫБОР ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СЕТЯХ С ИМПУЛЬСНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**Информация о статье**

Поступила:

30 января 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 марта 2026 г.

Принята к печати:

15 апреля 2026 г.

Опубликована:

04 июня 2026 г.

Ключевые слова:

нелинейные электроприемники, высшие гармонические составляющие токов и напряжений, пассивные фильтры, активные фильтры, реактивная мощность, компенсация, стоимость компенсации реактивной мощности

Аннотация.

Наличие потребителей электрической энергии, обладающих нелинейными вольт-амперными характеристиками, приводит к искажению синусоидальности тока и напряжения за счет появления высших гармоник, что сказывается на качестве электроэнергии, влияет на потери электроэнергии, надежность электрооборудования. С экономической точки зрения искажения напряжения являются причиной надбавки к тарифу, которая в зависимости от степени отклонения может достигать 10% от тарифа на электроэнергию. Компенсировать высшие гармоники тока и напряжения можно с помощью фильтрокомпенсирующих устройств – пассивных, активных и гибридных фильтров, отличающихся разнообразной топологией. Фильтрокомпенсирующие устройства обладают достоинствами и недостатками, поэтому сделать выбор в пользу конкретного устройства бывает сложно. Значительное количество работ по вопросам оптимизации методов выбора фильтрокомпенсирующих устройств, их размещения и управления подтверждает актуальность исследования. Задачами данного исследования являлся обзор применяемых методов и критериев оптимизации для выбора фильтров и их параметров и предложение метода выбора типа и параметров фильтров. В настоящей статье представлены результаты исследований зависимостей стоимости различных типов фильтрокомпенсирующих устройств от их параметров: реактивной мощности, допустимого тока, количества фильтруемых гармоник. Для определения параметров, при которых целесообразно использование активных фильтров, проведен расчет фильтров при разных значениях реактивной мощности, тока. Расчет проводился для случаев, когда требуется только фильтрация гармоник и когда необходимо дополнительно компенсировать реактивную мощность. По итогам исследования сделаны выводы о существовании зависимостей между стоимостью фильтрокомпенсирующих устройств и реактивной мощностью, током. Определено количество гармоник при разных значениях реактивной мощности, при которых выбор активных фильтров с точки зрения затрат на приобретение становится рациональным.

Для цитирования: Леонова Ю.Ю., Негадаев В.А. Анализ и выбор фильтрокомпенсирующих устройств в сетях с импульсными преобразователями // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 2 (184). С. 21-31. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-21-31, EDN: QIXJGV

Введение

Приемники электроэнергии и аппараты, присоединенные к электрическим сетям, предназначены для работы при определенных параметрах: частоте, напряжении, токе.

Одной из причин ухудшения качества электроэнергии является наличие потребителей электрической энергии, обладающих нелинейными вольт-амперными характеристиками: источники бесперебойного питания приемников электрической энергии, электросварочное оборудование, дуговые

электрические печи, установки индукционного нагрева, газоразрядные источники излучения, регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока. Такие потребители являются причиной появления несинусоидальности [1].

Несинусоидальность напряжения связана с появлением в кривой напряжения, помимо гармоники основной частоты U_1 , гармоник $U_{(n)}$ других высших частот, кратных основной частоте f_0 ($n = 2, 3, 4, \dots, \infty$), в том числе канонических, неканонических, интергармоник [2].

Проникновение высших гармоник в сеть приводит к нарушениям в работе систем автоматики, телемеханики, релейной защиты, электронных систем и коммуникаций, электрических машин. В сети возможно возникновение резонансных режимов на высших гармониках, при этом резко возрастают токи и напряжения на отдельных участках сети.

Высшие гармоники отрицательно влияют на работоспособность конденсаторов устройств компенсации реактивной мощности и в выпрямителях частотных преобразователей, так как потери энергии в конденсаторах пропорциональны частоте. Поэтому высокочастотные гармоники в сетевом напряжении вызывают перегрузку и повреждение конденсаторов [2].

Воздействие тока третьей гармоники (и гармоник, кратных трем) приводит к появлению нулевой последовательности. Период третьей гармоники втрое меньше основной, максимальные значения амплитуд совпадают по фазе и складываются в нулевом проводе. Суммарный ток всех гармоник в нейтральном проводе может превышать фазные значения в полтора-два раза.

Поэтому необходимы мероприятия по поддержанию синусоидальности напряжения в соответствии с предельно допустимыми значениями коэффициентов гармонических составляющих напряжений до 40-го порядка и значениями суммарного коэффициента гармонических составляющих, установленными ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Снижение высших гармоник также выгодно с точки зрения экономической эффективности, так как снижаются потери электроэнергии, исключаются штрафы за несоответствие показателей качества электроэнергии (значение надбавки к тарифу в зависимости от степени отклонения может быть от 0,2 до 10% тарифа на электроэнергию).

Для компенсации высших гармоник тока и напряжения используются пассивные, активные и гибридные фильтры различных конфигураций, которые могут работать и как фильтры частот, и как устройства компенсации реактивной мощности.

Пассивные фильтры, состоящие из набора емкостных и индуктивных компонентов, стоят дешевле, отличаются доступностью, простотой конструкции, эксплуатации (не требуют регулярного технического обслуживания), но они имеют ограничения по спектру компенсируемых гармоник. Кроме того, недостатком является невозможность адаптивной подстройки к изменениям гармонического спектра сети [3, 4, 5]. Однако за счет конфигурации можно расширить диапазон применения пассивных фильтров [2, 5].

Активные фильтры гармоник, подключаемые параллельно нелинейной нагрузке (такое подключение в большинстве случаев является более рациональным с точки зрения эффективности подавления высших гармоник), гибко реагируют на изменчивые условия и подавляют спектр гармонических

составляющих в сети от 2 до 40 порядка, но они отличаются высокой стоимостью. Также недостатком является невозможность применения таких фильтров в сетях с уже установленными конденсаторными установками коррекции коэффициента мощности из-за наличия резонансных явлений [3].

Гибридные устройства сочетают достоинства активных и пассивных фильтров: пассивные ветви гасят основные гармоники и компенсируют реактивную мощность, а активные модули корректируют оставшиеся искажения и гармоники, изменяющиеся в динамике. Также совместное применение с пассивными фильтрами в рамках гибридных систем позволяет снизить номинальные параметры активных фильтров.

Учитывая разнообразие решений компенсации гармонических составляющих тока и напряжения, а также достоинства и недостатки каждого вида фильтров, выбор фильтрокомпенсирующего устройства в сетях с импульсными преобразователями представляется актуальной задачей с точки зрения выбора как вида фильтров, так и их параметров.

Задачами данного исследования являются:

- рассмотрение существующих методов выбора фильтрокомпенсирующих устройств и критериев оптимизации для выбора;
- предложение метода выбора типа и параметров фильтров.

Методы

С развитием полупроводниковых приборов большое внимание уделяется исследованию оптимальных параметров активных фильтров. За последние годы вышло несколько тематических обзорных работ, посвященных: параллельным активным фильтрам [6], мета-эвристической оптимизации адаптивных параллельных фильтров [7], алгоритмам управления активным фильтром [8], снижению проблем с качеством электроэнергии, вызванных внедрением возобновляемых источников энергии в электросетевые системы с помощью Statcom [9].

В целом, если оценивать долю работ, посвященных активным фильтрам, по сравнению с работами, описывающими остальные типы фильтров, можно заметить, что иностранные авторы обращаются к рассмотрению активных фильтров чаще российских авторов (хотя и для российских авторов активные фильтры, несомненно, представляют интерес). Косвенно на это влияет то, что стоимость электроэнергии в иностранных государствах выше, чем в России. Стоимость неравномерна для различных типов потребителей и отличается от места расположения потребителя. Так, если сравнивать стоимость единицы электроэнергии в России (на примере Кемеровской области – Кузбасса) и в европейских странах (на примере Германии, Великобритании и Румынии), получается, что стоимость единицы электроэнергии отличается в 2-6 раз.

В статьях сравниваются основные конфигурации силовых цепей параллельных активных фильтров на основе традиционных транзисторов с изолированным затвором, активных фильтров с тран-

зисторами с изолированным затвором, выполненными на основе карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN, приводятся их преимущества и недостатки [6, 10–14].

Методы генерации задающего тока и методы управления током влияют на эффективность работы фильтров, поэтому ряд исследований посвящен обоснованию выбора конкретных методов, среди которых:

а) методы генерации задающего тока:

1) во временной области (метод р-р (метод мгновенной мощности); метод, основанный на синхронной системе отсчета; метод генерации мгновенной неактивной мощности; метод, основанный на декомпозиции тока на реактивные, активные и пустые составляющие и использование компонентов тока для генерации компенсирующего тока; метод обобщенной мгновенной реактивной мощности; метод матричного карандаша (МРМ)) [8, 15–18];

2) в частотной области (в основном основаны на анализе Фурье искаженных токов нагрузки, который включает либо быстрое преобразование Фурье, либо дискретное преобразование Фурье) [8, 19];

3) методы программных вычислений (алгоритм нечеткого логического управления, искусственная нейронная сеть, адаптивные линейные нейроны, генетический алгоритм, оптимизация роя частиц, оптимизация бактериального поиска пищи, оптимизация колонии муравьев, оптимизация стаи серых волков и их комбинации [20–23]);

б) методы управления током:

1) с помощью регуляторов задержки [20, 24–26];

2) метод прогнозного управления тока [8, 9].

Для управления напряжением на компенсационном конденсаторе используют пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы) (в том числе обучаемый в онлайн-режиме ПИ-регулятор, использующий метод оптимизации роя частиц для управления напряжением постоянного тока в активном фильтре [27]); пропорционально-резонансные регуляторы [11]; регуляторы с нечеткой логикой; регуляторы, работающие в скользящем режиме; регуляторы на основе искусственной нейронной сети (в том числе с двумя скрытыми слоями с семью нейронными функциями активации logsig и tansig и одним выходным слоем, имеющим линейную функцию активации [28]); синергетические регуляторы [29]; регуляторы на основе нечеткого пропорционального регулятора, линейного наблюдателя расширенного состояния (LESO) и канала компенсации суммарных помех [30].

Сложная топология фильтров и большое количество вариантов для реализации в части алгоритмов управления, высокая стоимость, сложность в установке и эксплуатации, высокие требования к системам измерений и управлению усложняют выбор параметров активного фильтра.

По сравнению с активными пассивные фильтры отличаются простотой, относительной дешевизной, но применимы не во всех случаях (у них сравни-

тельно невысокая эффективность при изменяющемся спектре гармоник, также пассивные фильтры настроены на определенный диапазон частот либо на конкретную частоту).

Гибридные фильтры, сочетающие в себе активную и пассивную составляющие, считаются с точки зрения стоимости более выгодными по сравнению с активными фильтрами. Однако сравнение средней удельной стоимости компенсации пассивным, активным и гибридным фильтрами показывает, что удельная средняя стоимость пассивного фильтра в 18,8 раза меньше удельной средней стоимости активного фильтра и в 18,4 раза – гибридного (удельная средняя стоимость: 380,9 руб./квар – пассивного фильтра; 7162,6 руб./квар – активного, 6994,2 руб./квар – гибридного [31]).

Как правило, при выборе устройств компенсации высших гармоник и их параметров критериями оптимальности являются стоимость потерь электроэнергии, стоимость фильтра, процент снижения высших гармоник, коэффициенты гармоник тока и напряжения в сети до и после компенсации, эксплуатационная надежность, техническая реализуемость и т. д. Некоторые исследователи предлагают дополнительно применять специфические критерии, например коэффициент полной мощности, коэффициент реактивной мощности, коэффициент мощности искажения [32]. Критерии могут как быть единичными, так и применяться совместно с другими.

Современные методы выбора фильтров основаны на имитационном моделировании и использовании оптимизационных алгоритмов оценки эффективности. Из-за того, что ни одно из решений не может быть оптимальным по всем критериям одновременно, процесс выбора типа фильтров и их параметров представляет сложность. Усложняет процесс выбора отсутствие однозначных методик по выбору компенсирующих устройств и тот факт, что состав расчетных параметров, используемых в программных средствах, не формализован [33].

Данный факт обуславливает интерес авторов к проблеме обоснования выбора устройств для компенсации высших гармоник тока и напряжения.

Среди методов выбора параметров пассивного фильтра можно выделить несколько методов:

- метод на основе составления математической модели сети электроснабжения и определения оптимальной мощности фильтра на основе критерия минимального значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения с проверкой обеспечения минимальной величины суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и дополнительной проверкой на возникновение бросков тока и напряжения при подаче напряжения на фильтр [4];

- метод на основе многокритериальной оптимизации с использованием теории нечетких множеств, где в качестве критериев предложено использовать капитальные затраты с учетом установки и монтажа устройства и эксплуатационных расходов, эффективность компенсации канонических и неканонических гармоник, потери мощности в элементах

фильтра, возможность компенсации реактивной мощности по основной гармонике [5, 31];

- алгоритм выбора параметров фильтра на основе моделирования для различных условий эксплуатации [10];

- метод, предполагающий корреляционный и регрессионный анализ для оценки воздействия значений тока, активной и реактивной мощностей на уровень напряжения, а также математическое моделирование объекта и технико-экономическое обоснование вариантов топологий компенсирующих устройств [34];

- аналитический метод расчета устройств параллельной емкостной компенсации в форме параллельного соединения широкополосных звеньев 3-5 порядка, на основе денормирования реактивных элементов фильтра по частоте и реактивной мощности [4].

- метод обоснования целесообразности применения фильтров по коэффициентам гармонических искажений (THD) тока и напряжения на входе и на выходе преобразователя, определяемым на основе спектрального анализа [4].

- расчетный метод определения параметров пассивного фильтра, использующий выведенные авторами в [35] зависимости.

Авторами в [32, 36] отмечается недостаточность исследований по оценке потерь в активных фильтрах, отсутствие единого методологического подхода к оценке эффективности работы активных фильтров. Для оценки качества электрической энергии в точке общего присоединения системы электроснабжения с активным силовым фильтром, нелинейной нагрузкой и сетью в [36] предложена математическая модель с возможностью внесения правок для изменения топологии фильтра, параметров широтно-импульсной модуляции, алгоритма формирования модулирующего сигнала. В [32] создан математический аппарат, в основе которого лежит метод переключающих функций и спектральный метод, авторами вводятся дополнительные критерии оптимальности: коэффициент полной мощности, коэффициент реактивной мощности, коэффициент мощности искажения.

Алгоритм оптимизации размещения компенсирующих устройств в сетях электроснабжения позволяет минимизировать как технические потери, так и затраты на оборудование. В обзорной статье [37] представлены различные подходы к оптимизации размещения и размеров активных силовых фильтров с точки зрения целевых функций и алгоритмов оптимизации. Среди алгоритмов оптимизации применялись неэвристические (комбинаторные, непрерывные, смешанное целочисленное программирование), метаэвристические (эволюционные, основанные на нечеткой логике, основанные на поведении человека, роевые) и эвристические. Авторы отмечают, что алгоритмы, основанные на оптимизации роя частиц, использовались чаще всего в недавних исследованиях. В [38], например, в качестве нового подхода к оптимизации размещения и распределения активных силовых фильтров и

конденсаторов предложен модифицированный алгоритм оптимизации роя частиц.

В [39] представлен нечеткий корректор, существенно улучшающий динамические характеристики путем коррекции параметров цифровых информационных фильтров (применяются при методе синхронного преобразования во вращающихся координатах).

Из анализа приведенных работ видно, что зачастую выбор параметров идет для конкретного типа фильтров, но при этом тип фильтра, как правило, не выбирается. Выбор осуществляется исходя либо из стоимости, либо из эффективности компенсации гармоник. Данный подход не учитывает характер зависимостей стоимости различных типов фильтрокомпенсирующих устройств от их параметров: реактивной мощности, допустимого тока, порядка компенсируемых гармоник и их количества.

Поэтому для обоснования целесообразности применения разных типов фильтров (активных, пассивных) авторами проведена работа по определению зависимостей между стоимостью устройств компенсации реактивной мощности, вызванной наличием высших гармоник, и их параметрами.

В качестве исходной информации использованы данные о параметрах активных фильтров группы компаний «Эталон» (Россия), конденсаторов и реакторов, входящих в пассивные фильтры. Активные и пассивные фильтры компенсации высших гармоник рассчитаны на номинальное напряжение 0,4 кВ трехфазной сети частоты 50 Гц.

Для вычисления параметров узкополосного пассивного фильтра (емкостей конденсаторов C , индуктивностей реакторов L), необходимых для компенсации определенных гармоник, использовалась следующая зависимость:

$$n = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{LC}} \quad (1)$$

На основании информации о параметрах и стоимости фильтрокомпенсирующих устройств построены графики зависимостей стоимости фильтров (пассивного и активного) от реактивной мощности, тока и количества фильтруемых гармоник (Рис. 1–4).

Результаты исследования

Из выражения (1) очевидно, что для компенсации высших гармоник определенного порядка можно подобрать разные значения емкостей и индуктивностей. При этом при увеличении емкости в определенное количество раз значение индуктивности будет снижаться в такое же количество раз.

Для нахождения зависимости между стоимостью пассивного фильтра в случае подавления 5-й гармоники рассчитывался фильтр, параметры которого (емкости конденсатора и индуктивности реактора) подбирались таким образом, чтобы значение \sqrt{LC} оставалось на одном уровне и соответствовало частоте тока 5-й гармоники на уровне 0,95-0,97 от f_5 . Всего рассмотрено 7 вариантов фильтров (Рис. 1).

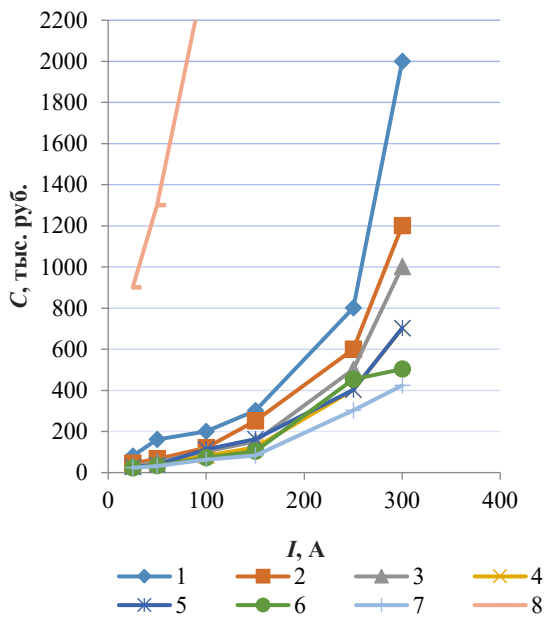


Рис. 1. Зависимость стоимости фильтров C от допустимого тока: 1–7 – пассивный фильтр с параметрами, мкФ/мГн: 10/46; 16/29; 20/23; 25/18; 30/15; 40/11; 50/10 соответственно; 8 – активный фильтр

Fig. 1. The dependence of the cost of C filters on the allowable current: 1–7 – passive filters with parameters, $\mu\text{F}/\text{mH}$: 10/46; 16/29 respectively; 20/23; 25/18; 30/15; 40/11; 50/10; 8 – active filter

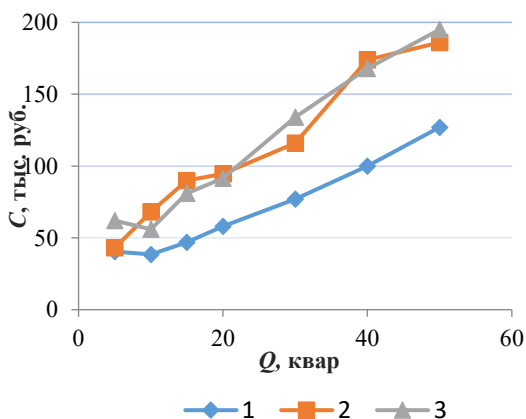


Рис. 2. Зависимость стоимости пассивного фильтра C от реактивной мощности при фильтрации гармоники: 1 – 3-я; 2 – 5-я; 3 – 7-я

Fig. 2. The dependence of the cost of a passive filter C on reactive power during harmonic filtering: 1 – 3rd; 2 – 5th; 3 – 7th

Так как в электрической сети зачастую стоит задача одновременного увеличения коэффициента мощности по основной гармонике, подобраны параметры пассивных фильтров для случаев, когда дополнительно к подавлению высших гармоник требуется компенсация реактивной мощности. Построены графики зависимости стоимости пассивного фильтра от реактивной мощности при фильтрации одиночных гармоник (Рис. 2) и группы гармоник (Рис. 3). На Рис. 2 представлены зависимости

для фильтров, рассчитанных для 3-й, 5-й и 7-й гармоник как оказывающих максимальное влияние.

Из анализа зависимостей на Рис. 1: при увеличении значения допустимого тока наблюдается увеличение стоимости пассивного фильтра, при этом стоимость возрастает тем быстрее, чем больше индуктивность фильтра. Стоимость активного фильтра возрастает линейно. Исходя из вида графиков, пересечение графиков зависимостей для активного фильтра и пассивного не ожидается.

Для уточнения характера связи между стоимостью пассивных фильтров и допустимым током найдены уравнения линейной регрессии и парной нелинейной регрессии, определены величины достоверности R^2 , коэффициенты корреляции r , проверена значимость полученных уравнений по критерию Фишера F ($F_{\text{крит}} = 6,61$) для семи вариантов фильтров (Рис. 1).

В Таблице 1 представлены выборочные уравнения экспоненциальной регрессии (2)-(8) (соответствуют вариантам 1-7), оказавшиеся статистически значимыми.

Средняя ошибка аппроксимации $A_{\text{ср}}$ для представленных уравнений составляет от 6,65 до 9,98% (следует отметить, что $A_{\text{ср}}$ достигало 18,33% для уравнения (7) и 21,02 – для уравнения (8), поэтому значение с максимальным значением ошибки аппроксимации было исключено, получены новые выборочные уравнения (7) и (8), которые сейчас представлены в Таблице 1).

Из Рис. 2 и 3 видно, что стоимость фильтрокомпенсирующих устройств практически линейно зависит от реактивной мощности. При этом увеличение числа компенсируемых гармоник не приводит к кратному увеличению стоимости фильтрокомпенсирующего устройства, так как реактивная

Таблица 1. Уравнения регрессии и их характеристики

Table 1. Regression equations and their characteristics

R^2	r	F
$y = 71,49e^{0,0104x}$ (2)		
0,9710	0,9853	167,41
$y = 37,133e^{0,0116x}$, (3)		
0,9939	0,9969	814,67
$y = 26,41e^{0,012x}$, (4)		
0,9945	0,9972	904,09
$y = 24,953e^{0,0114x}$, (5)		
0,971	0,985	167,41
$y = 18,907e^{0,0106x}$, (6)		
0,9917	0,9958	510,46
$y = 19,117e^{0,0115x}$, (7)		
0,9807	0,9903	510,46
$y = 18,953e^{0,0113x}$, (8)		
0,9917	0,9958	597,41

мощность распределяется между всеми ветвями фильтра с учетом амплитуды тока на ветвях и составляет практически такое же значение, что и для фильтра с подавлением одной гармоники.

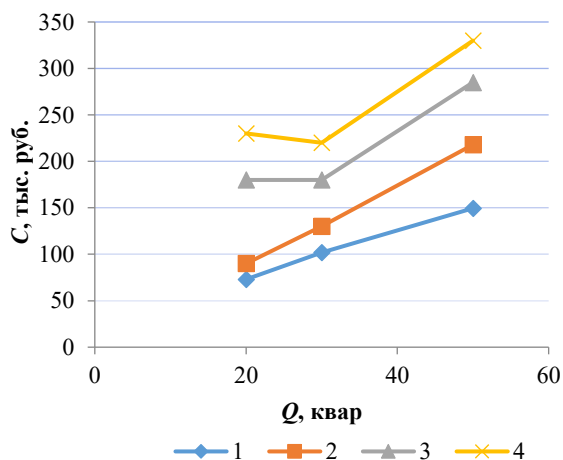


Рис. 3. Зависимость стоимости пассивного фильтра C от реактивной мощности Q при фильтрации гармоник: 1 – 3-я и 5-я; 2 – 3-я, 5-я и 7-я; 3 – 3-я,

5-я, 7-я и 11-я; 4 – 3-я, 5-я, 7-я, 11-я и 13-я
 Fig. 3. The dependence of the cost of a passive filter C on reactive power Q during harmonic filtering: 1 – 3rd and 5th; 2 – 3rd, 5th, and 7th; 3 – 3rd, 5th, 7th, and 11th; 4 – 3rd, 5th, 7th, 11th, and 13th

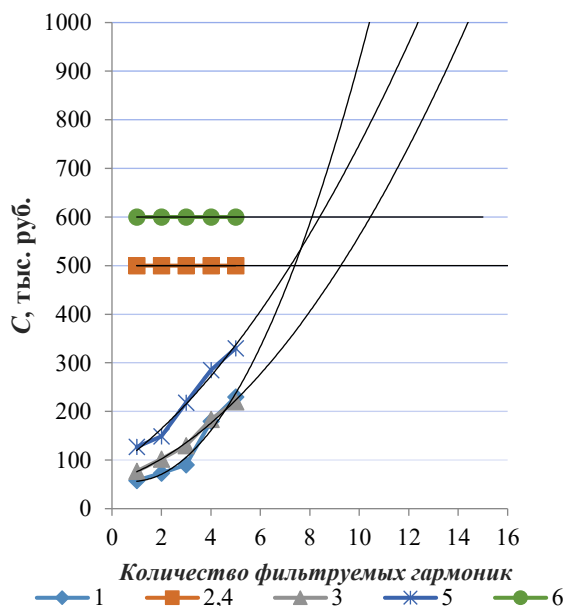


Рис. 4. Зависимость стоимости фильтра C от количества фильтруемых гармоник: 1, 3, 5 – пассивные фильтры с компенсацией реактивной мощности 20, 30, 50 квар соответственно; 2, 4, 6 – активные фильтры с компенсацией реактивной мощности 20, 30, 50 квар соответственно

Fig. 4. The dependence of the cost of a filter C on the number of filtered harmonics: 1, 3, 5 – passive filters with reactive power compensation of 20, 30, and 50 kvar, respectively; 2, 4, 6 – active filters

Так как стоимость активного фильтра при прочих равных условиях отличается в разы (особенно при малых токах), при этом стоимость фильтрации гармоник в основном зависит от тока, которые эти гармоники создают, и не зависит от количества и номера гармоник, а стоимость пассивных фильтров напрямую определяется количеством фильтруемых гармоник, а также их номером, определим то количество гармоник, подлежащих фильтрации, при котором стоимость пассивного фильтра приближается к стоимости активного фильтра. Расчет проведен для случаев компенсации реактивной мощности 20, 30 и 50 квар. На Рис. 4 изображена зависимость стоимости пассивного и активного фильтров от количества фильтруемых гармоник. Как видим из Рис. 4, точка пересечения графиков зависимости стоимости пассивного фильтра и активного фильтра, рассчитанных на компенсацию 20 квар, находится на значении, соответствующем примерно 7 гармоникам. Точке пересечения для фильтров, рассчитанных на компенсацию 30 квар, соответствует значение порядка 9 гармоник, 50 квар – 8 гармоник.

Выводы

По итогам проведенного анализа сделаны выводы. Существует зависимость между стоимостью фильтрокомпенсирующих устройств и током, реактивной мощностью. В случае активных фильтров зависимости между стоимостью и количеством фильтруемых гармоник нет. Однако ток определяет то количество гармоник, с которым может работать активный фильтр.

Активные фильтры могут быть рассмотрены в качестве фильтрокомпенсирующих устройств в случае, если в цепи протекают малые токи, но присутствует более 7 гармоник, коэффициент искажения которых (в том числе суммарный) не соответствует требованиям нормативной документации.

Количество гармоник, необходимых для фильтрации, может лечь в основу метода многокритериального анализа в качестве одного из критериев при выборе оптимальных параметров фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников С. В., Леонов А. П. Надежность изоляции статорных обмоток частотно-управляемых электродвигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18. № 1. С. 33–62. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-33-62.
2. Егоров Д. Э., Довгун В. П., Боярская Н. П., Ян А. В., Слюсарев А. С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 3–15. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
3. Сычев Ю. А., Зимин Р. Ю. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.

4. Шипулина У. Н., Мухаметгалеев Т. Х., Сидоров С. С., Мухаметов Г. М. Модель частотно-регулируемого электропривода в программном пакете Matlab // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24. № 5. С. 78–81.
5. Zhilin E. V., Prasol D. A., Savvin N. Y. Optimization of the structure of filter-compensating devices in networks with powerful non-linear power consumers based on fuzzy logic // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2022. Vol. 12. №. 6. Pp. 5730–5737. ISSN: 2088-8708. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737.
6. Popescu M., Bitoleanu A., Suru C. V., Linca M.; Alboteanu L. Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review // Energies. 2024. № 17, 2867. Pp. 1–42. DOI: 10.3390/en17122867.
7. Duc M. L., Hlavaty L., Bilik P., Martinek R. Harmonic Mitigation Using Meta-Heuristic Optimization for Shunt Adaptive Power Filters: A Review // Energies. 2023. № 16. Art. 3998. Pp. 1–55. DOI: 10.3390/en16103998.
8. Hoon Y., Mohd Radzi M.A., Hassan M.K., Mailah N.F. Control Algorithms of Shunt Active Power Filter for Harmonics Mitigation: A Review // Energies. 2017. Vol. 10. Art. 2038. DOI: 10.3390/en10122038.
9. Tareen W. U. K., Aamir M., Mekhilef S., Nakaoka M., Seyedmahmoudian M., Horan B., Memon M. A., Baig N. A. Mitigation of power quality issues due to high penetration of renewable energy sources in electric grid systems using three-phase APF/STATCOM Technologies: A Review // Energies. 2018. № 11(6). 1491. Pp. 1–42. DOI: 10.3390/en11061491.
10. Lange A. G., Redlarski G. Selection of C-Type Filters for Reactive Power Compensation and Filtration of Higher Harmonics Injected into the Transmission System by Arc Furnaces // Energies. 2020. № 13. Art. 2330. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/en13092330.
11. Ali Z. H., Raisz D. Comparative experimental evaluation of three-wire SAPF control strategies for power quality improvement // Energy Reports. 2025. Vol. 13. Pp. 1332–1349. DOI: 10.1016/j.egy.2025.01.020
12. Ahmed M. H., Wang M., Hassan M. A. S., Ullah I. Power loss model and efficiency analysis of three-phase inverter based on SiC MOSFETs for PV applications // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 75768–75781. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2922741.
13. Karania N., Alali M. A., Di Gennaro S., Barbot J.-P. Developed AC/DC/AC Converter Structure Based on Shunt Active Filter and Advanced Modulation Approach for Asymmetrical Cascade H-Bridge Multilevel Inverters // IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2023. Vol. 4. Pp. 583–602. DOI: 10.1109/OJIES.2023.3325101.
14. Lin H., Guo X., Chen D., Wu S., Chen G. A frequency adaptive repetitive control for active power filter with 380V/75A SiC-inverter // IEEE Trans. Ind. Appl. 2022. № 58. Pp. 5469–5479. DOI: 10.1109/TIA.2022.3176848.
15. Shakerighadi B., Ebrahimzadeh E., Taul M. G., Blaabjerg F., Bak C. L. Modeling and Adaptive Design of the SRF-PLL: Nonlinear Time-Varying Framework // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 28635–28645. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2972345.
16. Mota D. d. S., Tedeschi E. On Adaptive Moving Average Algorithms for the Application of the Conservative Power Theory in Systems with Variable Frequency // Energies. 2021. № 14(4). Art. 1201. DOI: 10.3390/en14041201.
17. El Ghaly A., Tarnini M., Moubayed N., Chahine K. A Filter-Less Time-Domain Method for Reference Signal Extraction in Shunt Active Power Filters // Energies. 2022. № 15. Art. 5568. DOI: 10.3390/en15155568.
18. Cheepati K. R., Parimalasundar E., Suresh K., Rivera M., Rao M. N., Pitchai A. Design of a novel shunt active harmonic compensator with AUV-PQ-SRF reference current extraction, OSV-MPC and SMC techniques // Sci Rep. 2025. № 15(1). Art. 28773. DOI: 10.1038/s41598-025-14259-7.
19. Yang B., Dai K., Yang C., Luo H., He K., Dai Z. Improvement of recursive DFT for APF with higher switching frequency to suppress wideband harmonics // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 144300–144312. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3121735.
20. Das S. R., Ray P. K., Sahoo A. K., Ramasubbareddy S., Babu T. S., Kumar N. M., Elavarasan R. M., Mihet-Popa L. A comprehensive survey on different control strategies and applications of active power filters for power quality improvement // Energies. 2021. Vol. 14. Art. 4589.
21. Jai A. A., Ouassaid M. Machine Learning-Based Adaline Neural PQ Strategy for a Photovoltaic Integrated Shunt Active Power Filter // IEEE Access. 2023. Vol. 11. Pp. 56593–56618. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3281488.
22. Rezapour H., Fathnia F., Fiuzy M., Falaghi H., Lopes A. M. Enhancing power quality and loss optimization in distorted distribution networks utilizing capacitors and active power filters: A simultaneous approach // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2024. № 155. Art. 109590.
23. Fei J., Zhang L., Zhuo J., Fang Y. Wavelet fuzzy neural supertwisting sliding mode control of an active power filter // IEEE Trans. Fuzzy Syst. 2023. № 31. Pp. 4051–4063. DOI: 10.1109/TFUZZ.2023.3272028.
24. Barik P. K., Shankar G., Sahoo P. K., Elavarasan R. M., Kumar S., Ibanez F. M., Houran M. A., Srivastava A. K., Terzija V. A novel negative feedback phase locked loop-based reference current generation technique for shunt active power filter. // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2023. № 153. Art. 109389. Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109389.
25. Puhan P. S., Ray P. K., Pottapinjara S. Performance analysis of shunt active filter for harmonic compensation under various non-linear loads // Int. J. Emerg. Electr. Power Syst. 2021. № 22. Pp. 21–29.
26. Vahedi H., Sheikholeslami A., Bina M. T., Vahedi M. Review and simulation of fixed and adaptive hysteresis current control considering switching losses and high-frequency harmonics // Adv. Power

Electron. 2011. Vol. 2011. Art. 397872. Pp. 1–6. DOI: 10.1155/2011/397872.

27. Madhusudhan Reddy M., Srinivasa Varma P., Lenine D. Improving gain of real time PI controller using particle swarm optimization in active power filter // Microprocess. Microsyst. 2023. № 97. Art. 104760. DOI: 10.1016/j.micpro.2023.104760.

28. Deffaf B., Debouche N., Benbouhenni H., Hamoudi F., Bizon N. A new control for improving the power quality generated by a three-level T-type inverter // Electronics. 2023. № 12. Art. 2117. DOI: 10.3390/electronics12092117.

29. Deffaf B., Hamoudi F., Habib B., Slimane M., Naamane D. Synergetic control for three-level voltage source inverter-based shunt active power filter to improve power quality // Energy Reports. 2023. № 10. Pp. 1013–1027.

<https://doi.org/10.1016/j.egyр.2023.07.051>

30. Zhou X., Cui Y., Ma Y. Fuzzy Linear Active Disturbance Rejection Control of Injection Hybrid Active Power Filter for Medium and High Voltage Distribution Network // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 8421–8432.

DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049832.

31. Zhilin E. V., Prasol D. A., Savvin N. Yu. Transformation Justification of types of filter compensating devices in 6 kV mine networks with powerful nonlinear electric receivers // ICES 2020. 2020. Pp. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899X/1089/1/012019.

32. Дыбко М. А. Оценка энергетической эффективности активных силовых фильтров для систем электроснабжения северных регионов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 3. С. 138–152. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3921.

33. Шамонов Р. Г., Тульский В. Н. Развитие требований к моделированию режимов работы энергосистем на частотах гармонических составляющих и на обратной последовательности токов и напряжений // Энергоэксперт. 2025. № 3. С. 20–25.

34. Корнилов Г. П., Газизова О. В., Абдулвелев И. Р., Бунин А. А., Лыгин М. М. Расширение свойств фильтрокомпенсирующих устройств в системах внутриводского электроснабжения // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1 (50). С. 21–25. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-21-26.

35. Атаманов М. Н., Дрей Н. М., Зиганшин А. Г., Михеев Г. М. Расчет параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 17–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42543748&ysclid=mkku34hbo2473660376> (дата обращения 30.12.2025).

36. Дыбко М. А., Нос О. В., Александров И. В. Математическая модель системы «сеть – нелинейная нагрузка» с активным силовым фильтром в режиме компенсации высших гармоник // Электротехника. 2023. № 2. С. 55–64. DOI: 10.53891/00135860_2023_2_55.

37. Buła D., Grabowski D., Maciazek M. A review on optimization of active power filter placement and sizing methods // Energies. 2022. № 15. Art. 1175. DOI: 10.3390/en15031175.

38. Rezapour H., Fathnia F., Fiuzy M., Falaghi H., Lopes A. M. Enhancing power quality and loss optimization in distorted distribution networks utilizing capacitors and active power filters: A simultaneous approach // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2024. № 155. Art. 109590. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109590.

39. Розанов Ю. К., Рябчицкий М. В., Смирнов М. И., Гринберг М. П. Применение аппарата нечеткой логики для улучшения динамических характеристик гибридных фильтров высших гармоник // Электричество. 2007. № 1. С. 23–31. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_12840940_43340432.pdf (дата обращения 30.12.2025).

© 2026 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Леонова Юлия Юрьевна, старший преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: LeonovaYuYu@kuzstu.ru.

Негадаев Владислав Александрович, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), кандидат технических наук, e-mail: nva.eav@kuzstu.ru.

Заявленный вклад авторов:

Леонова Юлия Юрьевна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Негадаев Владислав Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

THE ANALYSIS AND THE SELECTION OF FILTROCOMPENSATING DEVICES IN NETWORKS WITH PULSE CONVERTERS



Article info

Received:

30 January 2025

Accepted for publication:

15 March 2026

Accepted:

15 April 2026

Published:

04 June 2026

Keywords: Powerful non-linear electrical receivers, higher harmonic components of currents and voltages, passive harmonic filters, active harmonic filters, reactive power, compensation, cost of reactive power compensation

Abstract.

The presence of electrical energy consumers with non-linear volt-ampere characteristics leads to distortion of the current and voltage sine wave due to the appearance of higher harmonics, which affects the quality of electricity, energy losses, and the reliability of electrical equipment. From an economic perspective, voltage distortion causes an additional charge on the tariff, which can reach up to 10% of the electricity tariff. Higher harmonics of current and voltage can be compensated using filter-compensating devices, such as passive, active, and hybrid filters with various topologies. Filter-compensating devices have advantages and disadvantages, so it can be difficult to choose a specific device. A significant number of studies on optimizing the selection, placement, and control of filter-compensating devices confirm the relevance of this research. The objectives of this study were to review the methods and optimization criteria used to select filters and their parameters, and to propose a method for selecting the type and parameters of filters. This paper presents the results of studies of the cost dependencies of different types of filter compensating devices on their parameters: reactive power, permissible current, the number of filtered harmonics. To determine the parameters at which it is expedient to use active filters, the calculation of filters was carried out at different values of reactive power, current. The calculation was carried out for cases when only harmonic filtering is required and when it is necessary to additionally compensate for reactive power. Based on the results of the study, conclusions were drawn about the existence of dependencies between the cost of filter compensating devices and reactive power, current. The number of harmonics at different values of reactive power has been determined, at which the choice of active filters becomes rational in terms of acquisition costs.

For citation: Leonova Yu.Yu., Negadaev V.A. The analysis and the selection of filtrocompensating devices in networks with pulse converters. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 2(184):21-31 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-21-31, EDN: QIXJGV

REFERENCES

1. Kolesnikov S.V., Leonov A.P. Reliability of the Stator Windings Insulation of Variable-Frequency Electric Motors. *Electrical and Information Complexes and Systems*. 2022; 18(1):33–62. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-33-62.
2. Egorov D.E., Dovgun V.P., Boyarskaya N.P., Yan A.V., Slyusarev A.S. Power Factor Correction in Power Supply Systems with Multi-Phase Nonlinear Loads. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Energetika*. 2020; 22(6):3–15. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
3. Sychev Yu.A., Zimin R.Yu. Improving the Quality of Electric Power in the Mineral Resources Complex Power Supply Systems with Hybrid Filter-

- Compensating Devices. *Notes of the Mining Institute*. 2021; 247:132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
4. Shipulina U.N., Mukhametgaleev T.Kh., Sidorov S.S., Mukhametov G.M. Model of a Variable-Frequency Electric Drive in the Matlab Software Package. *Bulletin of the Technological University*. 2021; 24(5):78–81.
5. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y. Optimization of the structure of filter-compensating devices in networks with powerful non-linear power consumers based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022; 12(6):5730–5737. ISSN: 2088-8708. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737.

6. Popescu M., Bitoleanu A., Suru C.V., Linca M.; Alboteanu L. Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review. *Energies*. 2024; 17(2867):1–42. DOI: 10.3390/en17122867.
7. Duc M.L., Hlavaty L., Bilik P., Martinek R. Harmonic Mitigation Using Meta-Heuristic Optimization for Shunt Adaptive Power Filters: A Review. *Energies*. 2023; 16(3998):1–55. DOI: 10.3390/en16103998.
8. Hoon Y., Mohd Radzi M.A., Hassan M.K., Mailah N.F. Control Algorithms of Shunt Active Power Filter for Harmonics Mitigation: A Review. *Energies*. 2017; 10:2038. DOI: 10.3390/en10122038.
9. Tareen W.U.K., Aamir M., Mekhilef S., Nakaoka M., Seyedmahmoudian M., Horan B., Memon M.A., Baig N.A. Mitigation of power quality issues due to high penetration of renewable energy sources in electric grid systems using three-phase APF/STATCOM Technologies: A Review. *Energies*. 2018; 11(6):1491–1–42. DOI: 10.3390/en11061491.
10. Lange A.G., Redlarski G. Selection of C-Type Filters for Reactive Power Compensation and Filtration of Higher Harmonics Injected into the Transmission System by Arc Furnaces. *Energies*. 2020; 13(2330):1–19. DOI: 10.3390/en13092330.
11. Ali Z.H., Raisz D. Comparative experimental evaluation of three-wire SAPF control strategies for power quality improvement. *Energy Reports*. 2025; 13:1332–1349. DOI: 10.1016/j.egy.2025.01.020
12. Ahmed M.H., Wang M., Hassan M.A.S., Ullah I. Power loss model and efficiency analysis of three-phase inverter based on SiC MOSFETs for PV applications. *IEEE Access*. 2019; 7:75768–75781. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2922741.
13. Karania N., Alali M.A., Di Gennaro S., Barbot J.-P. Developed AC/DC/AC Converter Structure Based on Shunt Active Filter and Advanced Modulation Approach for Asymmetrical Cascade H-Bridge Multilevel Inverters. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. 2023; 4:583–602. DOI: 10.1109/OJIES.2023.3325101.
14. Lin H., Guo X., Chen D., Wu S., Chen G. A frequency adaptive repetitive control for active power filter with 380V/75A SiC-inverter. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2022; 58:5469–5479. DOI: 10.1109/TIA.2022.3176848.
15. Shakerighadi B., Ebrahimzadeh E., Taul M.G., Blaabjerg F., Bak C.L. Modeling and Adaptive Design of the SRF-PLL: Nonlinear Time-Varying Framework. *IEEE Access*. 2020; 8:28635–28645. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2972345.
16. Mota D.d.S., Tedeschi E. On Adaptive Moving Average Algorithms for the Application of the Conservative Power Theory in Systems with Variable Frequency. *Energies*. 2021; 14(4):1201. DOI: 10.3390/en14041201.
17. El Ghaly A., Tarnini M., Moubayed N., Chahine K. A Filter-Less Time-Domain Method for Reference Signal Extraction in Shunt Active Power Filters. *Energies*. 2022; 15:5568. DOI: 10.3390/en15155568.
18. Cheepati K.R., Parimalasundar E., Suresh K., Rivera M., Rao M.N., Pitchai A. Design of a novel shunt active harmonic compensator with AUV-PQ-SRF reference current extraction, OSV-MPC and SMC techniques. *Sci Rep*. 2025; 15(1):28773. DOI: 10.1038/s41598-025-14259-7.
19. Yang B., Dai K., Yang C., Luo H., He K., Dai Z. Improvement of recursive DFT for APF with higher switching frequency to suppress wideband harmonics. *IEEE Access*. 2021; 9:144300–144312. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3121735.
20. Das S.R., Ray P.K., Sahoo A.K., Ramasubbareddy S., Babu T.S., Kumar N.M., Elavarasan R.M., Mihet-Popa L. A comprehensive survey on different control strategies and applications of active power filters for power quality improvement. *Energies*. 2021; 14:4589.
21. Jai A.A., Ouassaid M. Machine Learning-Based Adaline Neural PQ Strategy for a Photovoltaic Integrated Shunt Active Power Filter. *IEEE Access*. 2023; 11:56593–56618. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3281488.
22. Rezapour H., Fathnia F., Fiuzy M., Falaghi H., Lopes A.M. Enhancing power quality and loss optimization in distorted distribution networks utilizing capacitors and active power filters: A simultaneous approach. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*. 2024; 155:109590.
23. Fei J., Zhang L., Zhuo J., Fang Y. Wavelet fuzzy neural supertwisting sliding mode control of an active power filter. *IEEE Trans. Fuzzy Syst*. 2023; 31:4051–4063. DOI: 10.1109/TFUZZ.2023.3272028.
24. Barik P.K., Shankar G., Sahoo P.K., Elavarasan R.M., Kumar S., Ibanez F.M., Houran, M.A., Srivastava A.K., Terzija V. A novel negative feedback phase locked loop-based reference current generation technique for shunt active power filter. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*. 2023; 153(109389):1–20. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109389.
25. Puhan P.S., Ray P.K., Pottapinjara S. Performance analysis of shunt active filter for harmonic compensation under various non-linear loads. *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst*. 2021; 22:21–29.
26. Vahedi H., Sheikholeslami A., Bina M.T., Vahedi M. Review and simulation of fixed and adaptive hysteresis current control considering switching losses and high-frequency harmonics. *Adv. Power Electron*. 2011; 2011(397872):1–6. <https://doi.org/10.1155/2011/397872>.
27. Madhusudhan Reddy M., Srinivasa Varma P., Lenine D. Improving gain of real time PI controller using particle swarm optimization in active power filter. *Microprocess. Microsyst*. 2023. № 97. 104760. DOI: 10.1016/j.micpro.2023.104760.
28. Deffaf B., Debouche N., Benbouhenni H., Hamoudi F., Bizon N. A new control for improving the power quality generated by a three-level T-type inverter. *Electronics*. 2023; 12:2117. DOI: 10.3390/electronics12092117.
29. Deffaf B., Hamoudi F., Habib B., Slimane M., Naamane D. Synergetic control for three-level voltage source inverter-based shunt active power filter to im-

prove power quality. *Energy Reports*. 2023; 10:1013–1027. DOI: 10.1016/j.egy.2023.07.051.

30. Zhou X., Cui Y. and Ma Y. Fuzzy Linear Active Disturbance Rejection Control of Injection Hybrid Active Power Filter for Medium and High Voltage Distribution Network. *IEEE Access*. 2021; 9:8421–8432. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049832.

31. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Yu. Transformation Justification of types of filter compensating devices in 6 kV mine networks with powerful nonlinear electric receivers. *ICES 2020*. 2020. Pp. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899X/1089/1/012019.

32. Dybko M.A. Assessment of the Energy Efficiency of Active Power Filters for Power Supply Systems in Northern Regions. *Izvestiya of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*. 2023; 334(3):138–152. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3921.

33. Shamonov R.G., Tulsy V.N. Development of Requirements for Modeling the Modes of Power Systems Operation at Harmonic Component Frequencies and Reverse Current and Voltage Sequences. *Energoekspert*. 2025; 3:20–25.

34. Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulvelev I.R., Bunin A.A., Lygin M.M. Expansion of the Properties of Filter-Compensating Devices in Systems of In-Plant Power Supply. *Electrical Systems and Complexes*. 2023; 1(50):21–25. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-21-26.

35. Atamanov M.N., Drey N.M., Ziganshin A.G., Mikheev G.M. Calculation of Parameters and Analysis of the Passive Harmonic Filter. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*. 2020; 1:17–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42543748&ysclid=mkku34hbo2473660376> (accessed on 30.12.2025).

36. Dybko M.A., Nos O.V., Alexandrov I.V. Mathematical model of the “network – nonlinear load” system with an active power filter in the mode of higher harmonic compensation. *Electrical Engineering*. 2023; 2:55–64. DOI: 10.53891/00135860_2023_2_55.

37. Buła D., Grabowski D., Maciazek M. A review on optimization of active power filter placement and sizing methods. *Energies*. 2022; 15:1175. DOI: 10.3390/en15031175.

38. Rezapour H., Fathnia F., Fiuzy M., Falaghi H., Lopes A.M. Enhancing power quality and loss optimization in distorted distribution networks utilizing capacitors and active power filters: A simultaneous approach. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*. 2024; 155(109590):1–17. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109590.

39. Rozanov Yu.K., Ryabchitsky M.V., Smirnov M.I., Grinberg M.P. Application of Fuzzy Logic to Improve the Dynamic Characteristics of Hybrid Higher Harmonic Filters. *Elektrichestvo*. 2007; 1:23–31. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_12840940_43340432.pdf (accessed on 30.12.2025).

© 2026 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Yuliya Yu. Leonova, Senior Lecturer, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: LeonovaYuYu@kuzstu.ru.

Vladislav A. Negadaev, Associate Professor, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), Candidate of Technical Sciences, e-mail: nva.eav@kuzstu.ru.

Contribution of the authors:

Yuliya Yu. Leonova – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

Vladislav A. Negadaev – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions.

Authors have read and approved the final manuscript.

