



ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Антонов Александр Игоревич,

кандидат технических наук, доцент,
Омский институт водного транспорта (филиал),
Сибирский государственный университет
водного транспорта,
Омск, Россия
E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

Руди Дмитрий Юрьевич,

Омский институт водного транспорта (филиал),
Сибирский государственный университет
водного транспорта
Омск, Россия

Предмет исследования: фильтрокомпенсирующие устройства.

Цель исследования: исследование конструктивных особенностей активных и пассивных фильтров гармоник.

Объект исследования: применение активных и пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.

Результаты исследования: на основе проведенных исследований показано, что фильтрокомпенсирующих устройств способны эффективно снижать негативное воздействие гармонических искажений.

Ключевые слова: качество электрической энергии, электрическая сеть, гармоническое воздействие, несинусоидальность напряжений, высшие гармоники.

APPLICATION OF ACTIVE AND PASSIVE FILTER-COMPENSATING DEVICES TO REDUCE THE NEGATIVE EFFECTS OF HARMONIC DISTORTIONS

Alexander I. Antonov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Omsk Institute of Water Transport (branch),
Siberian State University of Water Transport
Omsk, Russia
E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

Dmitry Yu. Rudy

Omsk Institute of Water Transport (branch),
Siberian State University of Water Transport
Omsk, Russia

Subject of research: processes occurring in electrical networks with induction heating installations.

Purpose of research: filter compensators.

Object of research: study of design features of active and passive harmonic filters.

Methods of research: in the process of performing research, scientific and technical generalization of literary sources according to the initial prerequisites for research, methods of probability theory and mathematical statistics were used. Experimental studies were carried out by a complex method using the Resurs-PKE device.

Main results of research: on the basis of conducted researches it is shown that filter-compensating devices can effectively reduce the negative impact of harmonic distortions.

Keywords: quality of electric energy, electric network, harmonic effect, voltage non-sinusoidality, higher harmonics.

ВВЕДЕНИЕ

Пассивные фильтры играют важную роль в устранении гармоник в энергосистемах. Эти фильтры работают на основных принципах теории электрических цепей, используя характерные свойства резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов для избирательного устранения нежелательных частот [1].

Пассивный фильтр представляет собой комбинацию резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, расположенных в различных конфигурациях для достижения желаемого эффекта фильтрации. Основная функция пассивного фильтра – пропускать определенные частоты, блокируя или ослабляя другие. В первую очередь, это достигается за счет использования частотно-зависимых характеристик импеданса конденсаторов и катушек индуктивности [2].

Конденсаторы и катушки индуктивности обладают различными характеристиками сопротивления в зависимости от частоты. Полное сопротивление (Z) конденсатора обратно

пропорционально частоте (f) и емкости (C), определяемой как

$$Z = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C). \quad (1)$$

С увеличением частоты сопротивление уменьшается, таким образом, конденсаторы имеют тенденцию «блокировать» низкочастотные сигналы и «пропускать» высокочастотные. С другой стороны, полное сопротивление катушки индуктивности прямо пропорционально частоте и индуктивности (L), определяемой как

$$Z = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L. \quad (2)$$

Катушки индуктивности имеют тенденцию «пропускать» низкочастотные сигналы и «блокировать» высокочастотные сигналы.

В контексте энергосистем пассивные фильтры обычно предназначены для «блокирования» или «улавливания» гармонических частот, пропуская основную частоту. Обычно это достигается за счет конструкции фильтра таким образом, чтобы его сопротивление был высоким на частотах гармоник и низким на основной частоте.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность пассивного фильтра в устранении гармоник зависит от его конструкции и размещения в энергосистеме. Конструкция включает в себя выбор соответствующих значений сопротивления, индуктивности и емкости для достижения желаемого эффекта фильтрации. Размещение фильтра в системе электроснабжения также имеет решающее значение, поскольку для эффективного устранения гармоник он должен располагаться близко к источнику.

Важно отметить, что, хотя пассивные фильтры относительно просты и экономичны, они менее гибки, чем активные фильтры. На их производительность могут влиять изменения условий эксплуатации системы. Поэтому для обеспечения их эффективной работы необходима тщательная разработка и внедрение.

Пассивные фильтры подразделяются на различные типы в зависимости от характеристик частотной характеристики и конфигурации схемы. Для устранения гармоник обычно используются три типа пассивных фильтров: фильтры с однонаправленной настройкой, фильтры с двойной настройкой и фильтры высоких частот.

Фильтр с одиночной настройкой, также известный как последовательный фильтр, пропускает определенную частоту, одновременно ослабляя все остальные частоты. Фильтры этого типа состоят из последовательного резонансного контура с катушкой индуктивности (L) и конденсатором (C). Резонансная частота контура (f_r) определяется значениями L и C , заданными через

$$f_r = 1/(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}). \quad (3)$$

На резонансной частоте полное сопротивление фильтра минимально, что позволяет пропускать соответствующую гармонику. Все остальные частоты имеют более высокое полное сопротивление и, таким образом, ослабляются. Фильтры с однонаправленной настройкой обычно предназначены для определения конкретной проблемной гармоники в энергосистеме.

На рисунке 1 показана принципиальная схема и типичная характеристика полного сопротивления для однонастраиваемого фильтра.

Фильтр с двойной настройкой представляет собой комбинацию двух фильтров с одиночной настройкой. Он предназначен для пропускания двух определенных частот при одновременном ослаблении всех остальных частот. Этот тип фильтров полезен, когда необходимо устранить две значимые гармоники. Конструкция фильтра с двойной настройкой включает в себя выбор значений индуктивности и емкости для каждого резонансного контура таким образом, чтобы они резонировали на двух целевых частотах гармоник.

На рисунке 2 показана принципиальная схема и типичная характеристика полного сопротивления фильтра с двойной настройкой.

Фильтр верхних частот пропускает все частоты выше определенной частоты среза, одновременно ослабляя все частоты ниже среза. Фильтр этого типа состоит из последовательной цепи с резистором (R) и конденсатором (C). Частота среза (f_c) определяется значениями R и C , задаваемыми через

$$f_c = 1/(2 \cdot \pi \cdot R \cdot C). \quad (4)$$

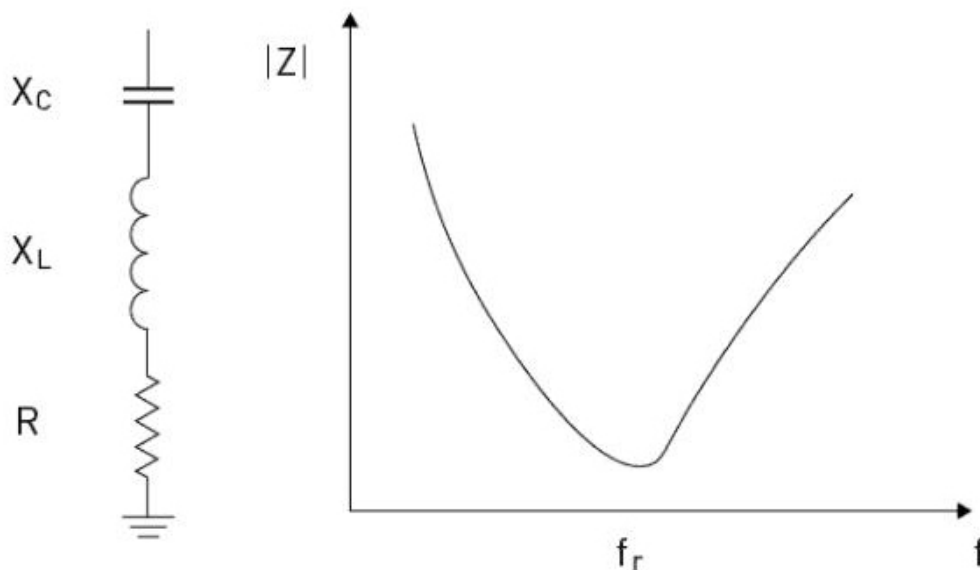


Рисунок 1. Фильтр с одиночной настройкой.

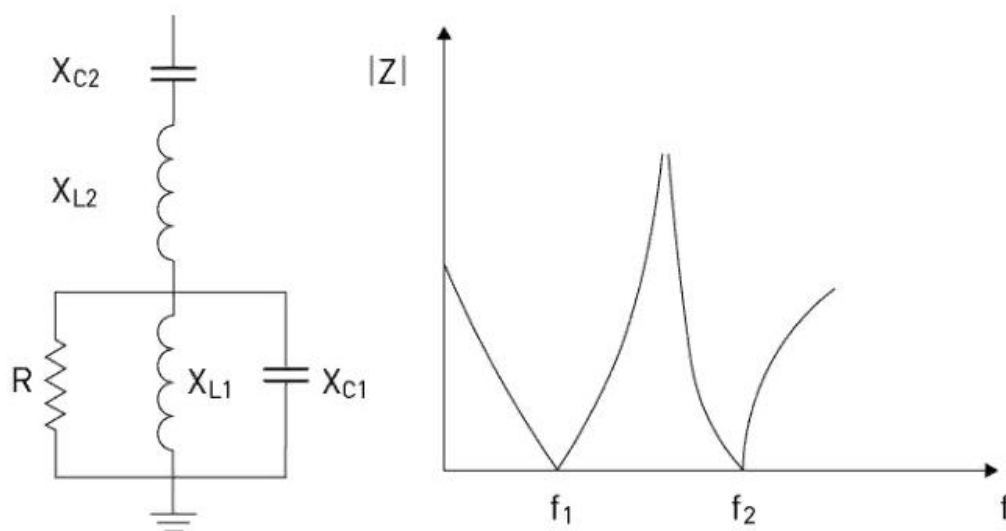


Рисунок 2. Фильтр с двойной настройкой.

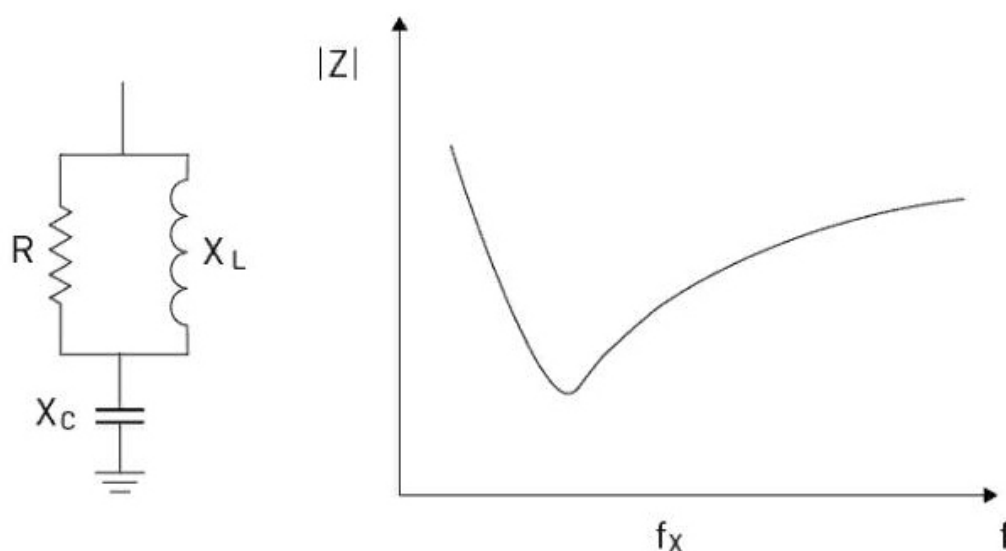


Рисунок 3. Фильтр верхних частот.

На частотах выше порогового значения импеданс фильтра уменьшается, позволяя частотам проходить. На частотах ниже порогового значения импеданс фильтра увеличивается, уменьшая частоты. Фильтры верхних частот полезны в системах электроснабжения, где имеется много гармоник высокого порядка, которые необходимо устранить.

На рисунке 3 показана принципиальная схема и типичная характеристика полного сопротивления фильтра верхних частот.

Проектирование пассивного фильтра для устранения гармоник в энергосистеме требует тщательного учета нескольких факторов, включая настройку фильтра, номинальную мощность фильтра, полное сопротивление и размещение фильтра в энергосистеме [3].

Настройка фильтра заключается в выборе значений индуктивной и емкостной составляющих фильтра, чтобы заставить его резонировать на частоте гармоники, которую необходимо устранить. Процесс настройки имеет решающее значение для обеспечения минимального полного сопротивления фильтра на частоте гармоники, что позволяет эффективно устранять ее. Например, резонансная частота однонастраиваемого фильтра определяется через формулу (3).

В случае фильтра с двойной настройкой два набора ЖК-контуров настроены так, чтобы резонировать на двух разных частотах.

Номинальная мощность фильтра определяет максимальный ток или напряжение, которые фильтр может выдерживать

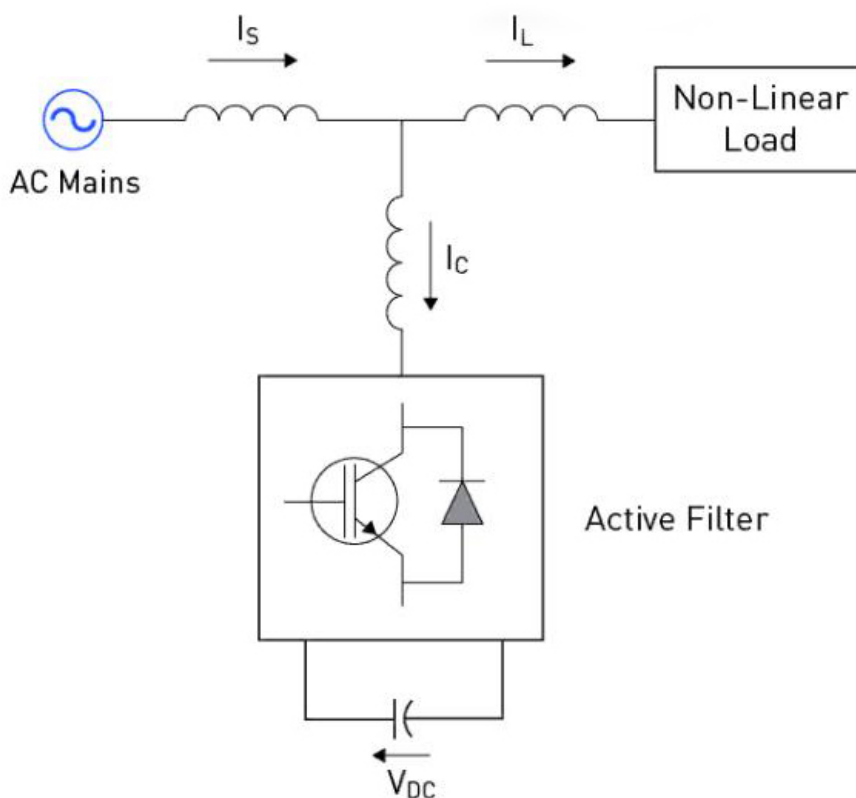


Рисунок 4. Шунтирующий активный фильтр.

без ухудшения своих характеристик или повреждения. Она определяется номинальной мощностью индуктивных и емкостных компонентов, используемых в фильтре. Полное сопротивление фильтра на резонансной частоте должно быть низким, чтобы позволить току гармоники проходить через фильтр, и высоким на основной частоте, чтобы предотвратить его шунтирование через фильтр. Точный расчет полного сопротивления фильтра жизненно важен для обеспечения того, чтобы фильтр функционировал должным образом, не вызывая нежелательных потерь мощности.

Размещение фильтра в системе электропитания является еще одним важным конструктивным соображением. В идеале фильтр должен располагаться как можно ближе к источнику гармоник [4]. Это помогает предотвратить распространение гармонических токов по энергосистеме, снижая вероятность возникновения проблем, связанных с гармониками, таких как повышенные потери, помехи для другого оборудования и ухудшение качества электроэнергии. Кроме того, фильтр следует размещать там, где он может эффективно подавлять гармоники, не вызывая проблем с потоком электроэнергии и не ставя под угрозу стабильность энергосистемы [5].

Активные фильтры используются для устранения гармоник в энергосистемах. В отличие от пассивных фильтров, которые

используют компоненты реактивной мощности (конденсаторы и катушки индуктивности) для создания пути для гармонических токов, активные фильтры работают за счет подачи токов, равных по величине, но противоположных по фазе гармоническим токам, присутствующим в системе [6].

Принцип активной фильтрации можно понять, рассмотрев простой случай однофазной системы. Если нелинейная нагрузка генерирует гармонический ток, этот ток будет искажать форму сигнала напряжения в энергосистеме, что приведет к ухудшению качества электроэнергии. Активный фильтр, подключенный к этой системе, измеряет ток нагрузки, вычисляет составляющие гармоник, а затем генерирует ток компенсации, который является точным отрицательным значением тока гармоник. Когда этот компенсационный ток подается в систему, он нейтрализует гармонический ток, в результате чего получается синусоидальный суммарный ток.

Активные фильтры в основном управляются силовыми электронными устройствами, такими как биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) или МОП-транзисторы. Эти устройства включаются и выключаются с высокой скоростью, позволяя фильтру быстро реагировать на изменения тока нагрузки и поддерживать эффективную компенсацию гармоник [7].

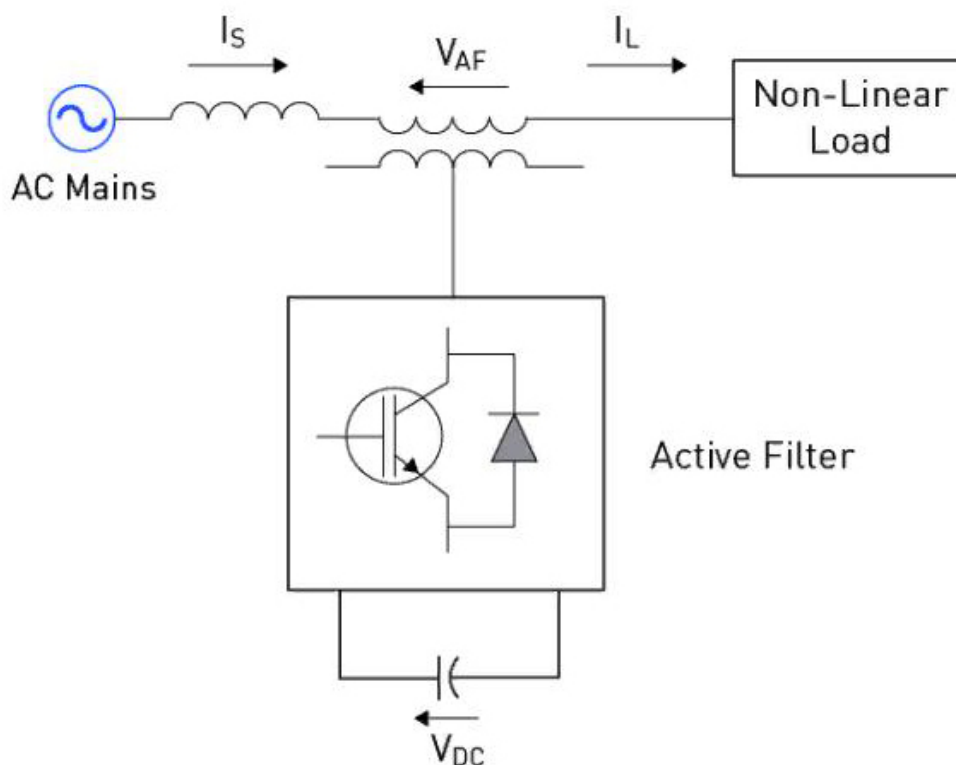


Рисунок 5. Серийный активный фильтр.

Активные фильтры имеют ряд преимуществ перед пассивными фильтрами. Они могут устранять несколько гармоник одновременно и адаптироваться к изменениям частоты энергосистемы и спектра гармоник. Кроме того, они не создают резонансных проблем в энергосистеме, которые могут возникнуть при использовании пассивных фильтров [8, 9].

Активные фильтры для смягчения гармоник в широком смысле можно разделить на три типа: шунтирующие активные фильтры, серийные активные фильтры и гибридные активные фильтры.

Шунтирующие активные фильтры подключаются параллельно нагрузке. Эти фильтры оценивают гармонический ток от нагрузки и генерируют компенсирующий ток, который нейтрализует гармоническую составляющую. Шунтирующие активные фильтры особенно эффективны для уменьшения гармоник тока и могут компенсировать несбалансированные и реактивные нагрузки. В первую очередь, они используются для повышения коэффициента мощности, балансировки нагрузки и устранения гармоник. Топология шунтирующего фильтра активной мощности показана на рисунке 4.

Серийные активные фильтры, как следует из их названия, подключаются последовательно к системе электропитания. Они работают за счет подачи напряжения, которое

нейтрализует гармоническое напряжение в системе, обеспечивая, таким образом, получение нагрузкой синусоидального напряжения. В отличие от шунтирующих активных фильтров, которые, в первую очередь, устраняют гармоники тока, серийные активные фильтры эффективно снижают гармоники напряжения. Они обычно используются для подавления колебаний напряжения, регулирования напряжения на клеммах и изоляции нагрузки от источника питания. Топология последовательного фильтра активной мощности показана на рисунке 5.

Гибридные активные фильтры представляют собой комбинацию как шунтирующих, так и последовательных фильтров, обычно включающих пассивный фильтр. Такая конфигурация позволяет одновременно снижать как гармоники тока, так и напряжения. Активная часть фильтра обрабатывает гармоники более высокого порядка с переменной частотой, в то время как пассивная часть обрабатывает гармоники более низкой частоты с фиксированной частотой. Гибридные активные фильтры используют преимущества как последовательных, так и шунтирующих фильтров, сводя к минимуму их недостатки. Топология гибридного активного фильтра мощности показана на рисунке 6.

Двумя наиболее распространенными стратегиями управления, используемыми в

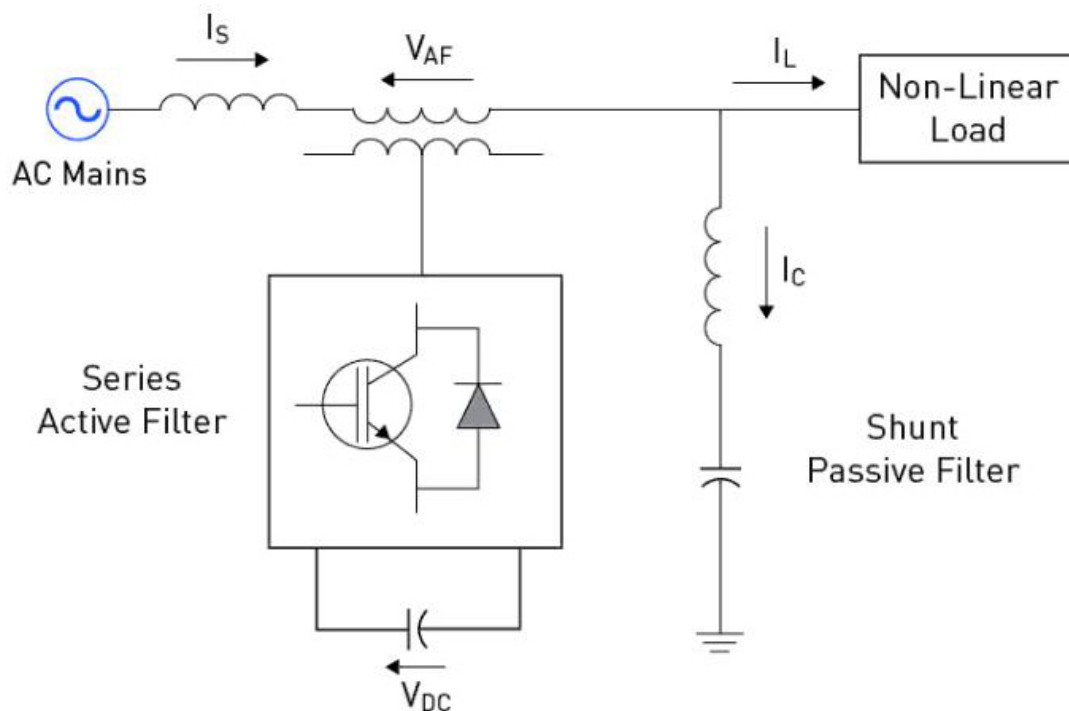


Рисунок 6. Шунтирующий активный фильтр.

активных фильтрах, являются метод синхронной системы отсчета и теория мгновенной реактивной мощности. Эти методологии отличаются своей сложностью, скоростью расчета и пригодностью для различных сценариев.

Метод синхронной системы отсчета, также известный как преобразование $dq0$, является широко используемой стратегией управления активными фильтрами. Основная концепция, лежащая в основе этого метода, заключается в преобразовании трехфазных напряжений и токов из временной области (ABC) в синхронный кадр $dq0$, где анализ сигнала становится более простым [10].

В синхронной системе отсчета токи и напряжения представлены в виде величин постоянного тока, а гармонические составляющие – в виде сигналов переменного тока. Алгоритм управления оценивает составляющие гармоник, отфильтровывая постоянную часть сигнала, а затем генерирует компенсирующий ток для устранения этих гармоник.

Теория мгновенной реактивной мощности (IRPT), также известная как теория $p-q$, является еще одной стратегией управления, используемой в активных фильтрах. Этот метод вычисляет активную (p) и реактивную (q) мощности в режиме реального времени и использует эти величины для определения эталонных компенсирующих токов [11].

Данная теория предназначен для мгновенной компенсации, что делает его подходящим для несинусоидальных,

несбалансированных и быстро меняющихся нагрузок. В отличие от метода синхронной системы отсчета, который требует преобразования в синхронный кадр, теория мгновенной реактивной мощности работает непосредственно во временной области. Эта особенность делает эту теорию эффективным с точки зрения вычислений методом, особенно ценным для приложений реального времени.

Однако важно отметить, что теория $p-q$ предполагает, что напряжение источника синусоидальное и сбалансированное. Если это предположение не выполняется, эффективность компенсации может ухудшиться.

Теория мгновенной реактивной мощности являются мощными инструментами для управления активными фильтрами. Выбор между этими методологиями зависит от конкретных требований энергосистемы, таких как характер нагрузки, спектр гармоник и доступные вычислительные ресурсы.

Номинальная мощность и размеры активных фильтров являются решающими факторами в процессе их проектирования, и они, в первую очередь, определяются на основе характера нагрузки и спектра гармоник, присутствующих в энергосистеме. Номинальная мощность активного фильтра обычно выражается в единицах его емкости ВА (вольт-ампер), которая определяет максимальную кажущуюся мощность, которую может выдержать фильтр.

При выборе активного фильтра важно учитывать ток основной частоты и гармонические токи, которые фильтр, как ожидается, должен устранять. Анализ спектра гармоник нагрузки обычно проводится для оценки уровней гармонических токов на различных частотах. Размер активного фильтра должен соответствовать максимальному току гармоник, обеспечивая эффективную компенсацию гармоник при любых условиях эксплуатации [12].

В активных фильтрах силовые электронные преобразователи служат центральным компонентом, который соединяет фильтр с системой электропитания. Интеграция активных фильтров с силовыми электронными преобразователями требует нескольких важных соображений.

Во-первых, выбор топологии силового электронного преобразователя влияет на производительность активного фильтра. Обычно используемые топологии включают преобразователь источника напряжения и преобразователь источника тока, каждый из которых обладает преимуществами и специфическими областями применения. Преобразователь источника напряжения, например, предпочтителен для шунтирующих активных фильтров, учитывая его способность генерировать требуемый ток компенсации независимо от тока нагрузки.

Во-вторых, схема управления силовым электронным преобразователем является важнейшим аспектом конструкции активного фильтра [13]. Схема управления определяет, как преобразователь реагирует на команды компенсации из алгоритма управления фильтром. Распространенные стратегии управления включают гистерезисный контроль, PI-контроль и скользящий режим, каждый из которых отличается своими рабочими характеристиками и сложностями реализации.

Наконец, при проектировании силового электронного преобразователя следует учитывать номинальную мощность системы, рабочее напряжение и частоту, а также требования к терморегулированию. Эти факторы определяют технические характеристики силовых электронных устройств (IGBT, MOSFET, диоды и т. д.) и других компонентов (катушки индуктивности, конденсаторы, радиаторы и т. д.), используемых в конструкции преобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Коммунальные предприятия часто устанавливают свои собственные требования к качеству электроэнергии и уровням гармоник, которые обычно основаны на конкретных

характеристиках их энергосистемы и эксплуатационных требованиях [14-16]. Они могут быть более строгими, чем предписано в стандарте [17], в первую очередь, для обеспечения стабильности и надежности их сети.

Коммунальные предприятия требуют от потребителей соблюдения этих требований, в противном случае могут быть наложены штрафные санкции. Следовательно, конструкция активного фильтра должна соответствовать государственным стандартам и особым требованиям, установленным предприятием.

Таким образом, стандарты и регламенты являются неотъемлемой частью проектирования и эксплуатации активных фильтров для устранения гармоник. Они служат для установления общей основы для определения допустимых уровней гармоник и гарантируют надежную работу всех подключенных устройств без вмешательства в работу друг друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руди, Д. Ю. Применение пассивных фильтров гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий / Д. Ю. Руди. – Текст: непосредственный // В сборнике: Фундаментальные научно-практические исследования: основные итоги – 2020. Сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 24–29.
2. Атаманов, М. Н. Расчёт параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник / М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей, А. Г. Зиганшин, Г. М. Михеев. – Текст: непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 17–25.
3. Методика расчета пассивных фильтров, предназначенных для компенсации высших гармоник тока в системах электроснабжения промышленных предприятий / Д. В. Коваленко, Б. Ю. Киселёв, Д. И. Плотноков [и др.]. – Текст: непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 1-4 (55). – С. 82–86.
4. Данилов, Г. А. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г. А. Данилов, Ю. М. Денчик, М. Н. Иванов, Г. В. Ситников; под ред. В. П. Горелова, В. Г. Сальникова. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. – 559 с. – Текст: непосредственный.
5. Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: моногр. / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с. – Текст: непосредственный.
6. Лютаевич, А. Г. Оценка эффективности использования активного фильтра гармоник в системах электроснабжения для улучшения качества электроэнергии / А. Г. Лютаевич, С. Ю. Долингер. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2010. – № 1 (87). – С. 133–136.

7. Замула, К. В. Активный фильтр гармоник как средство повышения качества электрической энергии / К. В. Замула, Ю. В. Соколов, А. В. Карманов. – Текст: непосредственный // Энергия единой сети. – 2018. – № 2 (37). – С. 22–32.
8. Руди, Д. Ю. Сравнительный анализ применения фильтрокомпенсирующих устройств в системах электроснабжения промышленных предприятий / Д.Ю. Руди, С. В. Горелов, К. С. Мочалин, А. А. Руппель. – Текст: непосредственный // В сборнике: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции». «Речной Форум 2019». Министерство транспорта Российской Федерации Федеральное агентство морского и речного транспорта, Омский институт водного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». – 2019. – С. 225–232.
9. Ключев, Р. В. Повышение качества электроэнергии на промышленных предприятиях за счет применения активного фильтра гармоник / Р. В. Ключев, И. И. Босиков, О. А. Гаврина, В. И. Голик. – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 2. – С. 313–324.
10. Боярская, Н. П. Адаптивная система формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник / Н. П. Боярская, А. М. Дербенев, В. П. Довгун. – Текст: непосредственный // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-1. – С. 25–29.
11. Жилин, Е. В. Алгоритмы управления активными фильтрами гармоник / Е. В. Жилин, Е. Ю. Казак. – Текст: непосредственный // В сборнике: МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОСТЬ НАУКИ КАК ФАКТОР ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ. сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 23–28.
12. Титов, Д. Ю. Выбор силовой схемы активного фильтра гармоник / Д. Ю. Титов, А. С. Плехов. – Текст: непосредственный // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. материалы научно-технической конференции. Нижний Новгород. – 2012. – С. 50–54.
13. Жуков, Н. А. Анализ систем управления активными фильтрами гармоник / Н. А. Жуков. – Текст: непосредственный // В сборнике: Образование, наука, производство. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – 2015. – С. 2988–2992.
14. Стандарт организации СТО 56947007 – 29.240.044–2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС». – 2010. – 143 с. – Текст: непосредственный
15. РД 153–34.0–15.501–00. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: Часть 1. Контроль качества электрической энергии. – М.: Минэнерго РФ. – 2000. – 67 с. – Текст: непосредственный
16. РД 153–34.0–15.502–02. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: Часть 2. Анализ электрической энергии. – М.: Минэнерго РФ. – 2002. – 49 с. – Текст: непосредственный
17. ГОСТ 32144-2013 Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 20 с. – Текст: непосредственный