

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК

Н.П. Боярская, А.М. Дербенев, В.П. Довгун

В статье предложен новый алгоритм управления характеристиками активных фильтров гармоник, основанный на использовании методов адаптивной цифровой обработки сигналов. Приведены результаты экспериментальной проверки алгоритма, показывающие его эффективность.

Ключевые слова: активные фильтры гармоник, искажения гармонического состава токов, цифровая обработка сигналов.

Широкое применение устройств с нелинейными и изменяющимися во времени характеристиками приводит к увеличению уровня высших гармоник в электрических сетях. Результатом воздействия гармоник на систему электроснабжения и оборудование потребителей является увеличение потерь во вращающихся машинах, трансформаторах, линиях электропередачи, ускоренное старение изоляции электрооборудования, ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики [1].

Для уменьшения уровня высших гармоник в сетях электроснабжения используют фильтрокомпенсирующие устройства. Такими устройствами являются пассивные и активные фильтры гармоник [2].

Традиционно для подавления высших гармоник в сетях электроснабжения используются пассивные фильтры гармоник (ПФГ). Такой фильтр представляет пассивную частотно-селективную цепь, обеспечивающую подавление или ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой. Достоинствами пассивных фильтров являются их простота и экономичность. Они дешевы, не требуют регулярного обслуживания, могут выполнять одновременно несколько функций: подавление гармоник, коррекция коэффициента мощности,

Существенный недостаток пассивных фильтров заключается в том, что они являются статическими устройствами. Их эффективность снижается при изменении гармонического состава токов и напряжений, а также при изменении параметров сети. Другой недостаток – возможность возникновения резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемого фильтром и индуктивностью

питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник.

В последнее время значительный интерес проявляется к активным фильтрам гармоник [2-4]. Такой фильтр представляет коммутируемое устройство, характеристики которого формируются с помощью специального закона управления. Активный фильтр гармоник может выполнять одновременно несколько функций:

- подавление высших гармоник;
- коррекция коэффициента мощности;
- уменьшение фликкера;
- коррекция частотных характеристик сети и исключение параллельных резонансов.

Такой широкий спектр возможностей активных фильтров гармоник объясняется тем, что они представляют собой адаптивные устройства, характеристики которых изменяются в зависимости от режима работы сети и характеристик нагрузки. Поэтому более точное название таких устройств – активные фильтрокомпенсирующие устройства (АФКУ).

Принцип действия АФКУ основан на том, что они генерируют токи или напряжения гармоник в противофазе с ними, и тем самым компенсируют искажения потребляемых токов. Значительный прогресс, достигнутый в последние годы в совершенствовании характеристик силовых полупроводниковых приборов, а также уменьшение стоимости последних делают активные фильтры гармоник конкурентоспособными с их пассивными аналогами. АФКУ используются крупными коммерческими и офисными потребителями, на транспорте [3].

Силовая часть АФКУ представляет инвертор с последовательно включенным сглаживающим фильтром (рисунки 1, 2).

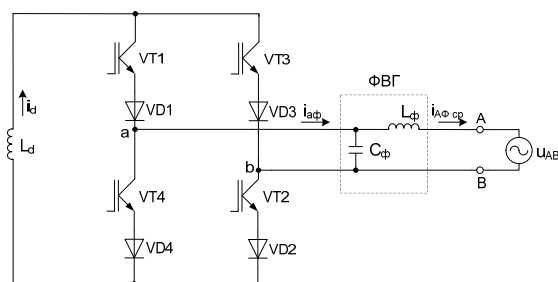


Рисунок 1 – Инвертор с индуктивным накопителем

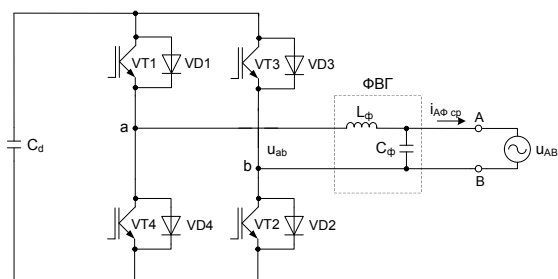


Рисунок 2 – Инвертор с емкостным накопителем

На выходе инвертора формируется ток i_{ϕ} , изменяющийся по закону, задаваемому системой управления. На ранних этапах развития АФКУ в качестве коммутируемых элементов использовались тиристоры и биполярные транзисторы. Позднее их заменили силовые МОП-транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Накопителями энергии в инверторе на стороне постоянного тока являются конденсаторы или реакторы. Схемы с емкостным накопителем имеют определенные технико-экономические преимущества и чаще используются на практике [2, 3].

Подсистема формирования управляющих сигналов является ядром любого АФКУ, определяющей его основные характеристики как в установившемся, так и в переходном режимах. Характеристики АФКУ в очень большой степени зависят от метода формирования управляющих сигналов. Методы формирования управляющих сигналов можно разделить на две группы [2, 3].

К первой группе относят методы формирования управляющих сигналов в частотной области. Стратегия формирования управляющих сигналов в частотной области основана на представлении несинусоидальных токов и напряжений в виде ряда Фурье.

Общий недостаток методов формирования управляющих сигналов в частотной области заключается в том, что требуется предварительная аналоговая фильтрация для того, чтобы исключить наложение спектров сигналов. Включение фильтра вносит дополнительные амплитудные и фазовые искажения. Кроме того, необходима синхронизация между частотой дискретизации и частотой основной гармоники. И, наконец, анализируемый сигнал должен быть стационарным, что на практике выполняется не всегда.

Методы формирования управляющих сигналов во временной области основаны на формировании компенсирующих сигналов из мгновенных значений токов и напряжений сети. Благодаря большему быстродействию они получили преимущественное распространение.

Для формирования управляющих сигналов во временной области используется метод мгновенной реактивной мощности, методы, основанные на использовании нейронных сетей, а также методы цифровой обработки сигналов.

Метод мгновенной реактивной мощности основан на вычислении мгновенных значений величин, получивших название мгновенной активной и реактивной мощностей. Эти величины содержат постоянные и переменные составляющие. В случае, если напряжение имеет синусоидальную форму, переменная составляющая мгновенной мощности определяется гармониками тока, потребляемого нелинейной нагрузкой. Управляющий сигнал можно получить, выделяя переменную составляющую мгновенной мощности с помощью фильтра верхних частот.

Недостаток метода мгновенной реактивной мощности заключается в том, что он применим только для трехфазных цепей. Кроме того, выделение переменной составляющей с помощью фильтра верхних частот неизбежно вносит амплитудные и фазовые искажения в компенсирующий сигнал.

Применение технологий цифровой обработки сигналов для управления характеристиками АФКУ позволяет использовать разнообразные хорошо разработанные адаптивные методы спектрального оценивания и компенсации помех [5, 7], а также эффективные и недорогие аппаратные средства, такие как цифровые процессоры обработки сигналов (ЦПОС).

Таким образом, использование методов цифровой обработки сигналов и методов

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК

нейронных сетей для управления характеристиками АФКУ является весьма перспективным. Это направление начало интенсивно развиваться в последние годы, поэтому многие вопросы, касающиеся применения этих методов в энергетике, остаются нерешенными.

В статье рассмотрен метод формирования управляющих сигналов для активных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на использовании методов цифровой обработки сигналов.

Спектральный состав сигнала, формируемого системой управления АФКУ, должен совпадать с гармоническим составом несинусоидального тока, генерируемого нелинейной нагрузкой. Исключение составляет только основная гармоника. В компенсирующем токе она должна отсутствовать.

Для получения такого сигнала можно использовать аналоговый режекторный фильтр, настроенный на частоту основной гармоники [6]. Однако использование аналогового режекторного фильтра имеет серьезные недостатки, связанные с тем, что такой фильтр является статическим устройством, и его характеристики не могут изменяться при изменении частоты и амплитуды основной гармоники. Таким образом, для формирования управляющего сигнала АФКУ необходимо адаптивное устройство, характеристики которого изменяются при изменении спектрального состава несинусоидальных токов или напряжений.

Структурная схема адаптивного режекторного фильтра, компенсирующего гармонику основной частоты, показана на рисунке 3.

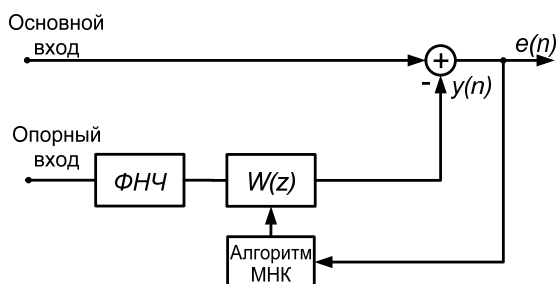


Рисунок 3 – Структурная схема адаптивного режекторного фильтра

На основной вход подается сигнал, пропорциональный несинусоидальному току или напряжению сети. Сигнал, поступающий на опорный вход, пропорционален основной гармонике напряжения. На выходе фильтра формируются отсчеты компенсирующего сиг-

нала $e(n)$. $W(z)$ – передаточная функция адаптивного фильтра, ФНЧ – фильтр нижних частот.

Структурная схема адаптивного КИХ-фильтра в форме цифровой линии задержки показана на рисунке 4.

Функциональными узлами цифрового фильтра являются умножители, сумматоры и элементы задержки. На рисунке 4 a_i – весовые коэффициенты фильтра.

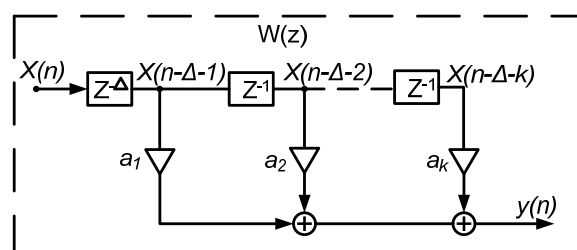


Рисунок 4 – Структура КИХ-фильтра в форме цифровой линии задержки с отводами

Выходным сигналом фильтра является сигнал ошибки $e(n)$, равный разности между основным сигналом $d(n)$ и откликом КИХ-фильтра

$$e(n) = - \sum_{k=0}^{N-1} a_k x(n-k) + d(n). \quad (1)$$

Весовые коэффициенты фильтра необходимо подстроить таким образом, чтобы минимизировать сумму квадратов ошибки предсказания на выходе фильтра. Для этой цели использован алгоритм метода наименьших квадратов (МНК) Уидроу-Хоффа. Его основные достоинства – простота программной реализации и малые вычислительные затраты.

В соответствии с алгоритмом МНК коррекция весовых коэффициентов адаптивного фильтра проводится по формуле

$$a_k(n+1) = a_k(n) - 2\mu e(n)x(n-k). \quad (2)$$

Из (2) следует, что для определения уточненного значения весового коэффициента a_k необходимы отсчет сигнала ошибки $e(n)$ и отсчет входного сигнала $x(n-k)$. На каждой итерации алгоритм МНК требует выполнения $2N+1$ операций. Параметр μ определяет скорость и устойчивость процесса адаптации. В [7] показано, что при выборе достаточно малой величины μ ошибка будет асимптотически стремиться к нулю.

Экспериментальное исследование предложенного алгоритма было проведено с помощью лабораторного комплекса Elvis II фирмы National Instruments. Цифровой адаптивный фильтр был реализован в программной среде LabVIEW 8.6.

В качестве примера рассмотрим результаты компенсации высших гармоник в спектре тока однофазного мостового выпрямителя. Схема выпрямителя, собранная на монтажной плате лабораторного комплекса Elvis II, показана на рисунке 5.

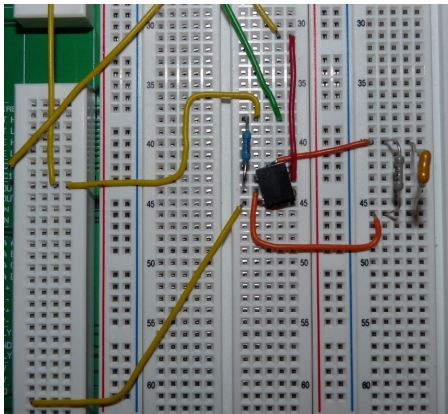


Рисунок 5 – Схема выпрямителя

Ток на входе однофазного мостового выпрямителя имеет форму, показанную на рисунке 6. Сигнал, пропорциональный входному току выпрямителя, подается на основной вход режекторного фильтра. Сигнал на опорном входе адаптивного фильтра синусоидален.

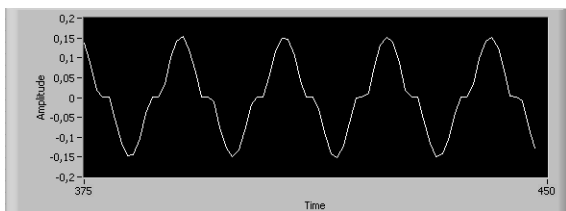


Рисунок 6 – Сигнал на основном входе фильтра

Порядок адаптивного фильтра был выбран равным $n = 16$, коэффициент оптимизации $\mu = 0.005$.

Коэффициент мощности вычисляется по формуле

$$\lambda = \cos \varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \eta_1^2}}, \quad (3)$$

где η_1 – коэффициент гармоник, определяемый по формуле

$$\eta_1 = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}}{I_1}. \quad (4)$$

Спектр сигнала, поступающего на основной вход фильтра, показан на рисунке 7. Коэффициент гармоник сигнала, поступающего на основной вход $K_f = 25,86\%$.

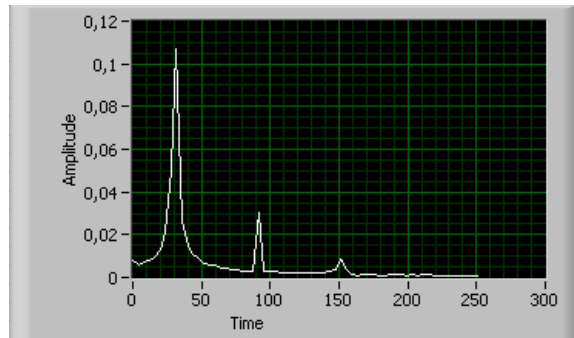


Рисунок 7 – Спектр сигнала, поступающего на основной вход

Осциллограмма компенсирующего сигнала, получаемого на выходе режекторного фильтра, показана на рисунке 8. Восстановленный сигнал, равный разности сигнала, поступающего на основной вход режекторного фильтра, и компенсирующего сигнала, показан на рисунке 9.

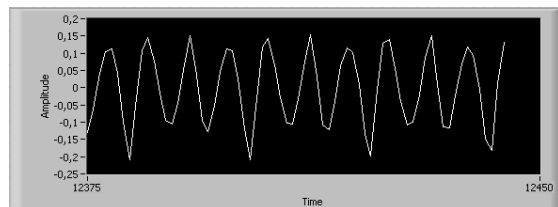


Рисунок 8 – Компенсирующий сигнал

Восстановленный сигнал имеет почти синусоидальную форму, а его частота равна частоте первой гармоники входного сигнала.

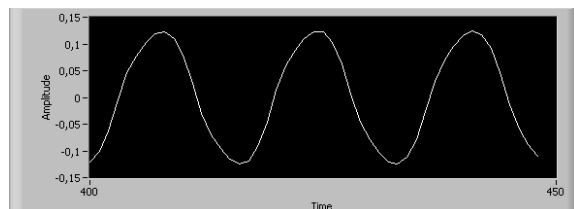


Рисунок 9 – Восстановленный сигнал

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК

Спектр восстановленного сигнала показан на рисунке 10. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала $K_r = 6,32 \%$.

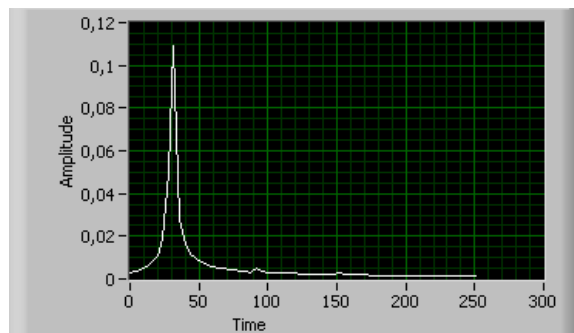


Рисунок 10 – Спектр восстановленного сигнала

Проведенные эксперименты показали, что предложенный алгоритм формирования управляющих сигналов позволяет эффективно подавлять искажения, вносимые нелинейной нагрузкой, а также корректировать коэффициент мощности сети. При этом предварительная настройка адаптивного фильтра не требуется.

Выводы

1. Рассмотрен метод формирования управляющих сигналов для активных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на использовании методов цифровой обработки сигналов.
2. Основой системы формирования управляющих сигналов является адаптивный цифровой фильтр в форме линии задержки с отводами, настраиваемый с помощью алгоритма СКО.
3. Исследована зависимость характеристик АФКУ от основных параметров адаптивного фильтра.
4. Результаты экспериментальной проверки предложенного метода показали, что с

его помощью можно эффективно подавить высшие гармоники несинусоидальных напряжений и токов, а также компенсировать реактивную составляющую первой гармоники тока.

5. Предлагаемый метод формирования управляющих сигналов не требует предварительной настройки АФКУ. Его характеристики могут изменяться в режиме реального времени при изменении спектров несинусоидальных напряжений и токов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
 2. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов/ Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. Изд. 2-е. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
 3. Akagi H. Active harmonic filters. Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, No. 12. – pp. 2128-2141.
 4. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. – IEEE trans. on industrial electronics. – 1999. – Vol. 46, No 5. – P. 960-971.
 5. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К. Ф.Н. Коуэна, П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.: ил.
 6. Luo S., Hou Z. An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents. – IEEE trans. on industrial electronics, Vol. 42, No 1, 1995, pp. 85-89.
 7. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2006. – 856 с.: ил.
- Боярская Н.П.**, ст. преп. каф. «ТОЭ», Красноярский государственный аграрный университет, тел. 8(391)211-34-40, E-mail: bnp2006dvg@mail.ru;
- Дербенев А.М.**, студ., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск);
- Довгун В.П.**, д.т.н., проф., Сибирский федеральный университет, проф. каф. «САУП», тел. 8(391)249-75-51, E-mail: vdovgun@afu-kras.ru.