

УДК 621.791.92.03-52

Бурлака В.В.¹, Гулаков С.В.², Бублик С.К.³, Дьяченко М.Д.⁴

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

Предложена схема параллельного активного фильтра на основе инвертора напряжения с дополнительным корректирующим звеном, позволяющим увеличить скорость изменения выходного тока фильтра и расширить частотный диапазон эффективного подавления гармоник тока, тем самым значительно улучшив качество работы фильтра.

В настоящее время в электрических сетях имеется большое количество потребителей, имеющих нелинейную зависимость потребляемого тока от напряжения сети. Это различные управляемые и неуправляемые выпрямители, циклоконвертеры и пр. Несинусоидальный ток потребления подобных нагрузок приводит к искажению формы кривой напряжения сети, что ведет к негативным последствиям [1]: увеличению потерь в электрических машинах и аппаратах, увеличению интенсивности старения изоляции, появлению перенапряжений из-за резонансных явлений в сети, ухудшению работы устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики вследствие появления высокочастотных помех и др.

Обычно задачу устранения влияния на сеть нелинейных нагрузок решают с помощью установки фильтрокомпенсирующих устройств, в качестве которых могут выступать пассивные или активные фильтры.

Пассивные фильтры в настоящее время наиболее широко используются в промышленных электрических сетях с уровнем напряжения 0,4 кВ и выше, особенно в системах большой мощности. Достоинства их заключаются в простоте установки, настройки и эксплуатации, так как чаще всего они представляют собой набор соединенных последовательно-параллельно L-C элементов. К недостаткам можно отнести необходимость предварительного расчета несинусоидальности электрической сети, а также возможность подавления гармоник в ограниченном диапазоне частот, ширина которого зависит от типа и конструкции пассивного фильтра.

С появлением мощных управляемых электронных ключей (MOSFET и IGBT транзисторов, запираемых тиристоров) стало возможным активно влиять на качество потребляемой электроэнергии. При этом сформировалось два направления деятельности:

- создание активных выпрямителей с малыми искажениями формы входного тока;
- создание устройств активной фильтрации искажений формы тока.

Активные фильтры (АФ) подразделяются на последовательные [2], параллельные [3] и гибридные [4].

Последовательный АФ представляет собой инвертор напряжения, нагруженный на трансформатор, вторичная обмотка которого соединяется последовательно с нагрузкой. К достоинствам последовательного АФ следует отнести возможность управления напряжением в точке подключения нагрузки. Но сложность подключения и защиты от перегрузки, плохой контроль тока сети сделали применение последовательных АФ ограниченным.

Параллельный АФ представляет собой инвертор с токовым выходом, подключаемый параллельно нагрузке. Он свободен от недостатков, присущих последовательному АФ и имеет следующие достоинства: простота подключения и защиты, прямое управление током и лучшее качество подавления гармоник тока. Параллельные АФ обычно строятся на основе трехфазного

¹ПГТУ, аспирант

²ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

³ПГТУ, ст. преп.

⁴ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

инвертора напряжения или инвертора тока с интерфейсным фильтром на выходе (LC-фильтр соответствующего порядка). Фильтры на основе инверторов тока не получили широкого применения из-за громоздкости накопительного дросселя. На сегодняшний день подавляющее большинство параллельных АФ строятся на основе трехфазных мостовых инверторов напряжения.

Гибридный АФ представляет собой инвертор напряжения, подключенный к сети через последовательный LC-фильтр, настроенный на 5-ю и/или 7-ю гармонику. Такое решение позволяет уменьшить мощность инвертора и снизить требования к размаху его выходного напряжения. Но наличие резонансного звена на выходе инвертора не позволяет эффективно подавлять гармоники с частотами, значительно превышающими частоту настройки LC-фильтра.

Наибольшее распространение получили гибридные и параллельные АФ благодаря простоте подключения и возможности прямого управления током.

Основными проблемами при эксплуатации параллельных АФ на основе инверторов являются: ограниченная скорость изменения выходного тока, вызванная необходимостью применения интерфейсного фильтра и, как следствие, ограниченный частотный диапазон эффективной компенсации высших гармоник; наличие в выходном токе помех на частоте переключения, что приводит к перемещению спектра гармоник в сторону высоких частот (5 – 20 кГц) и может привести к возникновению резонансных явлений в сети. Повышение качества подавления высших гармоник может быть достигнуто путем увеличения частоты переключения инвертора. Основной недостаток этого способа – резкое увеличение потерь в транзисторных ключах.

В работе [5] приведены осциллограммы тока некоторых нелинейных нагрузок и осциллограммы тока при включении параллельного АФ. Если ток нагрузки имеет резкие изменения, АФ на основе инвертора напряжения принципиально не способен обработать их. Так, при работе однофазного симисторного регулятора напряжения с активной нагрузкой при угле включения 90° коэффициент нелинейных искажений (КНИ) тока составляет без фильтра 51 %, с фильтром 16,7 %. Для 6-пульсного выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку (автономный инвертор), соответствующие значения составляют 109 % и 13,2 %. Для сравнения, КНИ тока 12-пульсного выпрямителя без фильтра составляет 13 %. Таким образом, АФ не всегда обеспечивает достаточное подавление гармоник тока.

Целью работы является модификация параллельного АФ, позволяющая значительно увеличить скорость изменения выходного тока фильтра и эффективно подавлять скачкообразные изменения тока, вызываемые нелинейной нагрузкой.

На рис. 1 показана упрощенная структурная схема системы управления параллельного АФ на основе инвертора напряжения. Цель установки АФ заключается в том, чтобы ток, потребляемый от источника, совпадал по фазе с напряжением источника и содержал только основную гармонику. Для этого выходной ток i_L инвертора регулируется таким образом, чтобы в сумме с током нагрузки i_H форма тока сети i_C была синусоидальной.

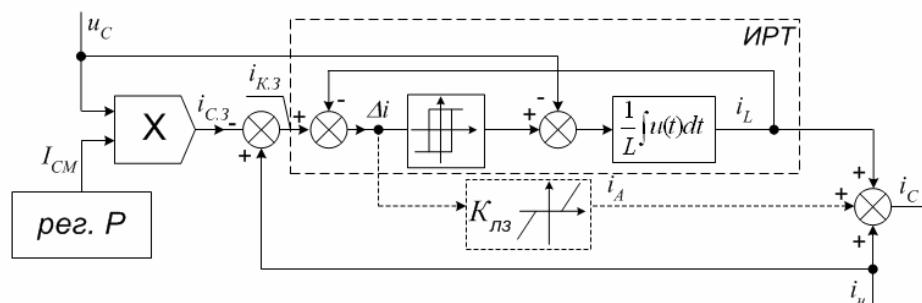


Рис. 1 – Структурная схема системы управления АФ

Регулятор активной мощности *рег. P* обеспечивает симметрирование и стабилизацию напряжения звена постоянного тока. Это инерционный ПИ-регулятор, выходной сигнал которого определяет амплитуду тока, потребляемого от сети. Для стабилизации звена постоянного тока необходимо выполнение условия баланса мощности

$\int_0^T u(t) \cdot i_H(t) dt = \int_0^T u(t) \cdot i_C(t) dt$, где T – период сети. Так как $u(t)$ и $i_C(t)$ синусоидальны, то амплитуда $i_C(t)$ может быть найдена как $I_{CM} = \frac{2}{U_{CM} \cdot T} \int_0^T u(t) \cdot i_H(t) dt$, где U_{CM} – амплитуда напряжения сети.

Сигнал задания амплитуды I_{CM} поступает на перемножитель, который осуществляет его умножение на сигнал напряжения сети. В результате на выходе перемножителя формируется задание на ток сети. Из этого задания производится вычитание тока нагрузки. Результатом становится сигнал, задающий ток корректора $i_{K.3} = i_{C.3} - i_H$. Этот сигнал поступает на импульсный регулятор тока (ИРТ, см. рис. 1), реализованный с использованием принципа гистерезисного управления. Выходным сигналом ИРТ является ток дросселя i_L , который суммируется с током нагрузки в точке подключения.

Для уменьшения ошибки регулирования выходного тока предлагается к выходу инвертора подключить корректирующее звено, работающее в режиме генератора тока. Выходной ток этого звена регулируется таким образом, чтобы устранить ошибку регулирования инвертора. Для этого в схему управления АФ (рис. 1) вводится дополнительное корректирующее звено $K_{ЛЗ}$ (обозначено пунктиром), на вход которого поступает сигнал ошибки регулирования выходного тока Δi , а выходной ток складывается с выходным током инвертора i_L .

На рис.2 представлена схема силовой части модифицированного АФ для работы с 4-проводной нелинейной нагрузкой в сети 0,4 кВ. Устройство содержит: инвертор напряжения, выполненный на IGBT-транзисторах VT1 – VT6 с обратными диодами VD1 – VD6, питающийся от звена постоянного тока с накопительными конденсаторами C4, C5; датчики тока дросселей RS1 – RS3 и тока нагрузки RS4 – RS6; интерфейсный фильтр, образованный дросселями L1 – L3 и конденсаторами C1 – C3; схему управления (СУ); корректирующее звено, выполненное на полевых транзисторах VT7 – VT12.

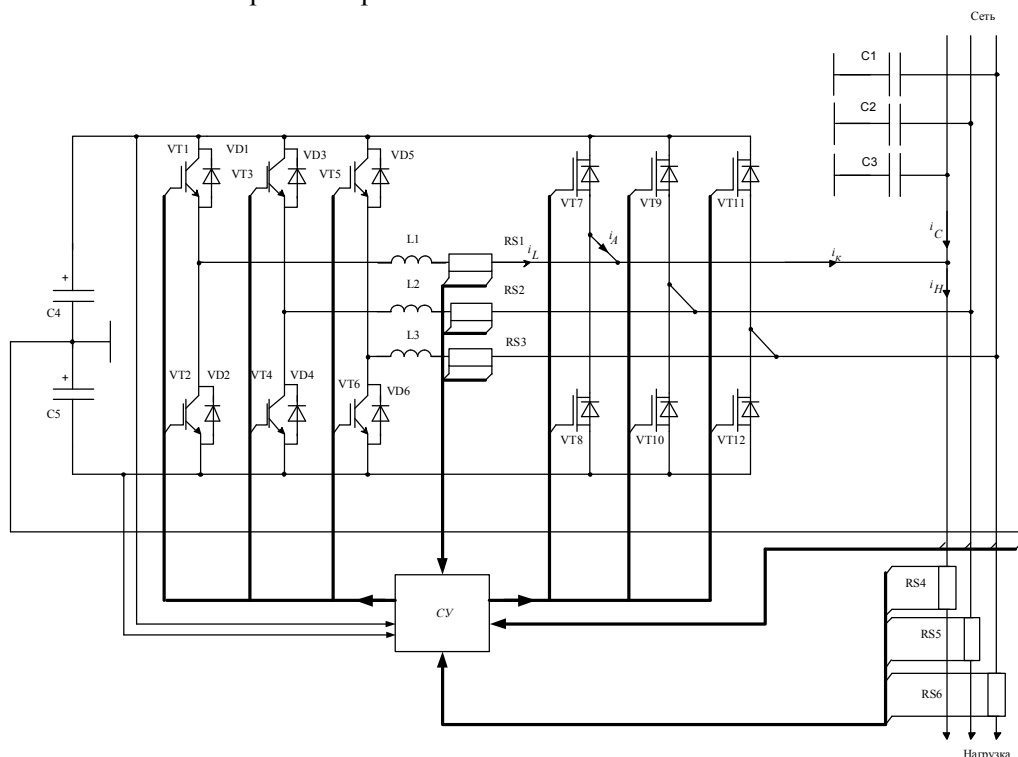


Рис. 2 – Принципиальная схема силовой части модифицированного АФ

Дополнительно введенное корректирующее активное звено VT7 – VT12 работает в режиме линейного источника тока класса В и обеспечивает выходной ток i_A специальной формы, компенсирующий ошибку регулирования основного выходного тока АФ i_L , что

позволяет значительно уменьшить остаточный КНИ тока сети и при необходимости подавить помехи на несущей частоте инвертора, не прибегая к усложнению интерфейсного фильтра и не уменьшая ширину полосы эффективного подавления гармоник. Кроме этого, высокая скорость реакции корректирующего звена позволяет даже расширить полосу эффективного подавления путем противофазного введения в ток i_A составляющих высших гармоник тока нагрузки, лежащих вне полосы подавления основного фильтра.

На рис. 3 приведены расчетные осциллограммы тока сети при работе симисторного регулятора напряжения с активной нагрузкой, на рис. 4 – при работе 6-пульсного выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой. Параметры АФ: максимальная частота переключения 25 кГц, $L=600$ мкГн, напряжение звена постоянного тока ± 418 В, напряжение сети 220 В (фазное).

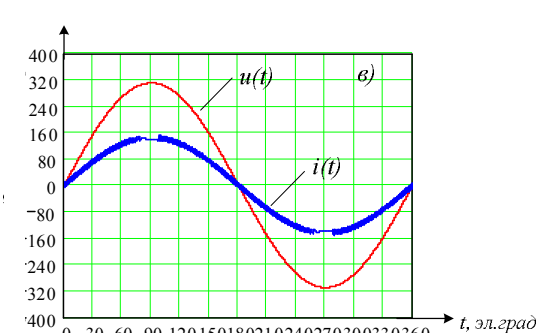
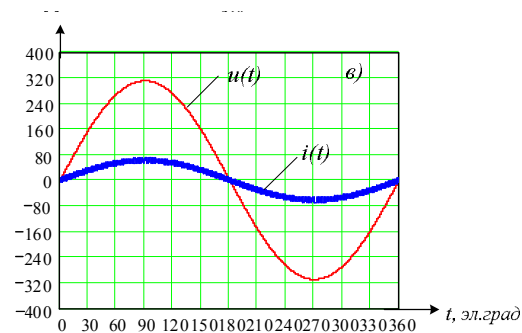
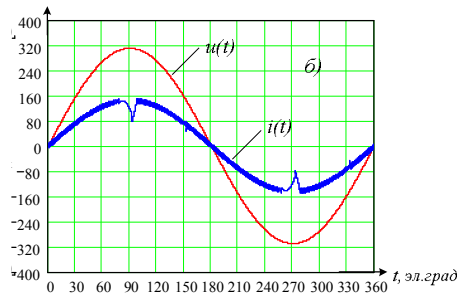
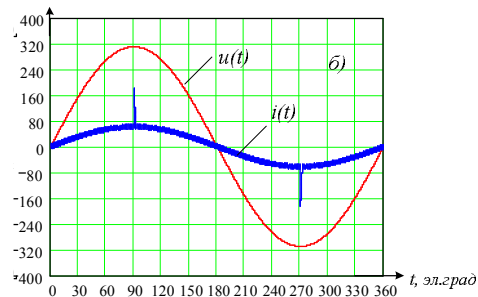
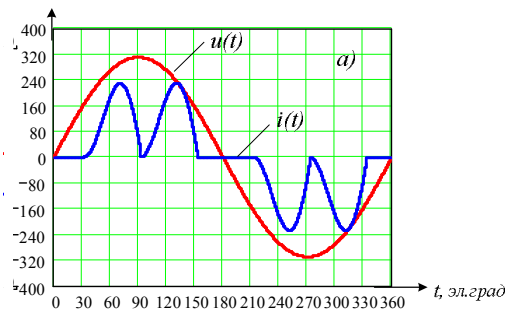
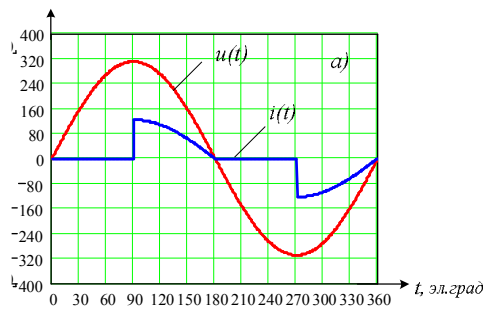


Рис. 3 – Расчетные осциллограммы тока сети при работе симисторного регулятора напряжения с активной нагрузкой (а – АФ отключен. КНИ=63,9 %; б – ток сети с отключенным линейным корректором. КНИ = 9,5 %; в - ток сети с включенным линейным корректором. КНИ = 1,1 %)

Рис. 4 – Расчетные осциллограммы тока сети при работе 6-пульсного выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой (а – АФ отключен. КНИ = 64,7 %; б – ток сети с отключенным линейным корректором. КНИ = 7,9 %; в – ток сети с включенным линейным корректором. КНИ = 1,5 %)

Для обеспечения выходного тока АФ до 40 А (среднеквадратичное) и рабочей частоте инвертора порядка 20 – 25 кГц транзисторы VT1 – VT6 могут быть типа IRGPS60B120KD (International Rectifier), управление которыми может быть обеспечено драйверами затворов типа IR2213 или IR2214, имеющими выходной ток порядка 2 А. Система управления может быть выполнена на однокристальном микроконтроллере общего применения (например,

ATMega168) или специализированном цифровом сигнальном процессоре (например, ADSP2104).

В качестве VT7 – VT12 выбраны транзисторы, предназначенные для работы в линейном режиме с большой областью безопасной работы. Это могут быть, например, транзисторы APL1001 компании Advanced Power Technology [6] или IXTB30N100L компании IXYS Semiconductor [7].

При необходимости увеличить выходные токи до 200 – 300 А на фазу можно в качестве силовых ключей инвертора VT1 – VT6 применить модуль PM450CLA120 (Mitsubishi), а каждый из транзисторов VT7 – VT12 заменить на несколько параллельно включенных APL1001 или IXTB30N100L с принятием соответствующих мер по выравниванию токов.

Потери активной мощности в корректирующем звене не превышают в первом случае 4,5 %, во втором случае 0,8 % мощности нагрузки.

Возможно изменение алгоритма работы корректирующего звена с тем, чтобы подавлять пульсации выходного тока на частоте переключения. Но работа в подобном режиме приводит к значительному росту потерь активной мощности в корректирующем звене. Поэтому полное подавление пульсаций может иметь смысл только в специальных случаях, когда качество работы АФ важнее потерь мощности в нем.

Как видно, введение дополнительного корректирующего звена приводит к снижению уровня пульсаций и снижению остаточного коэффициента гармоник.

Выводы

1. Предложенная модификация параллельного АФ позволяет значительно подавить ошибку регулирования выходного тока путем введения дополнительного корректирующего звена, работающего в режиме генератора тока.
2. Наличие корректирующего звена позволяет подавлять гармоники высоких порядков, фильтрация которых классическими импульсными АФ невозможна.
3. Дальнейшим направлением исследований может быть создание быстродействующей системы с промежуточным накоплением энергии в резонансном звене с целью снижения потерь мощности в АФ.

Перечень ссылок

1. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 262 с.
2. A controller based on resonant filters for a series active filter used to compensate current harmonics and voltage unbalance / G. Escobar, A. M. Stankovic, V. Cardenas, P. Mattavelli. // Conference on Control Applications Glasgow, Scotland, U.K. September 18 – 20. – 2002. – P. 7 – 12.
3. Gaiceanu M. Active power compensator of the current harmonics based on the instantaneous power theory / M. Gaiceanu // The annals of "Dunarea de jos" university of Galati: electrotehnics, electronics, automatic control, informatics. Fascicle III, 2005. – P. 23 – 28.
4. Ucak O. Design and implementation of a shunt active power filter with reduced dc link voltage / O. Ucak, I. Kocaba, A. Terciyanli // TUBITAK – Space technologies research institute, power electronics group METU campus, TR 06531, Ankara, Turkey. – 5 с.
5. McGranaghan M. Active filter design and specification for control of harmonics in industrial and commercial facilities. / M. McGranaghan // Electrotek Concepts, Inc. Knoxville TN, USA. – 9 с.
6. Frey R. New 500V Linear MOSFETs for a 120 kW Active Load / R. Frey, D. Grafham, T. Mackewich // Application Note, Advanced Power Technology (APT), 2000. – 8 с.
7. Sattar Abdus MOSFETs Withstand Stress of Linear-Mode Operation / Abdus Sattar, Vladimir Tsukanov // Power Electronics Technology, April 2007. – P. 34 – 39.

Рецензент: Ю.Л. Саенко
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 27.02.2009