

Из рис. 3 видно, что в трехфазном СЭГ с ДЗО результирующая электромагнитная сила  $F_{em}$  существенно зависит от положения ротора, что обуславливает динамический электромагнитный момент. Таким образом, не в полной мере выполняется условие обеспечения непрерывного преобразования энергии в электрической машине.

Достижение постоянства электромагнитных сил и момента при изменении угла поворота ротора в СЭГ с ДЗО, работающего на АВН, представляется возможным, если обеспечить индуктирование в обмотках генератора трапецеидальных линейных ЭДС, близких к распределению в воздушном зазоре индукции магнитного поля возбуждения. Обеспечение полигармонического закона изменения линейных ЭДС электрических генераторов представляется возможным путем использования многофазных обмоток, число фаз которых является нечетным числом и больше трех.

#### Литература

1. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Изд. 2-е. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
2. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.

УДК 621.311.24:621.311.25:621.311.26

## **АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА**

**Р. Е. Первененок, А. Л. Сицко**

*Военная академия Республики Беларусь, г. Минск*

Ухудшение качества электрической энергии, вызванное увеличением уровня высших гармоник тока и напряжения, становится серьезной проблемой для систем электроснабжения. Источником высших гармоник тока и напряжения является электрическая нагрузка с нелинейной вольт-амперной характеристикой, к числу которых относятся многие современные энергосберегающие устройства.

Качество электрической энергии оказывает отрицательное влияние на систему электроснабжения, так как при несоответствии показателей требованиям приводит к износу электрооборудования и нарушению работы специальной вычислительной техники.

Анализ литературы [1], посвященной вопросу повышения качества электрической энергии, показал, что широкое распространение получили такие устройства повышения качества электрической энергии, как пассивные, активные и гибридные (активно-пассивные) фильтры. Пассивные фильтры являются наиболее экономически выгодными устройствами, так как требуют небольших затрат для их производства, но имеют ряд недостатков, связанных с возможностью возникновения резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемого пассивным фильтром и системой электроснабжения на частотах, близких частотам высших гармоник. Гибридные фильтры имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что выходной ток (или напряжение), выдаваемый в противофазе с высшей гармонической составляющей сетевого тока (напряжения), не совпадает с ней по форме (в силу специфики работы инвертора), в результате чего в спектре сетевого тока (напряжения) появляются дополнительные гармонические составляющие. Кроме того, активная часть гибридного фильтра отличается повышенной сложностью алгоритмов управления и большими аппаратными затратами, необходимыми для ее реализации. В связи с этим

становится актуальной разработка средства улучшения КЭ на основе активных фильтров с улучшенной системой управления.

Способы управления характеристиками силовых активных фильтров (АФ), основанные на применении алгоритмов цифровой обработки сигналов и нейронных сетей, начали интенсивно развиваться в последние годы, поэтому многие вопросы применения этих методов остаются нерешенными.

Формируемый системой управления АФ спектральный состав сигнала должен совпадать в противофазе с гармоническим составом генерируемого нелинейной нагрузкой несинусоидального тока, не содержащим гармонику на основной частоте.

Характеристики АФ в основном зависят от системы формирования управляющих сигналов. Основные исследования АФ направлены на получение качественных и быстрых алгоритмов выделения опорных токов и напряжений в системе формирования управляющих сигналов.

Одним из распространенных способов формирования управляющих сигналов АФ является использование аналогового режекторного фильтра, настроенного на частоту основной гармоники [2]. Однако использование аналогового режекторного фильтра имеет недостатки, связанные с тем, что такой фильтр является статическим устройством, и его характеристики не изменяются при изменении частоты и амплитуды основной гармоники. Для формирования управляющего сигнала АФ необходимо адаптивное устройство, характеристики которого изменяются при изменении спектрального состава несинусоидальных токов или напряжений.

Исследования алгоритмов, адаптивной фильтрации в системе формирования управляющих сигналов АФ, представленных в таблице, было проведено в программном комплексе Matlab. Наиболее эффективным стал нормализованный алгоритм средних квадратов (NLMS). В качестве примера рассмотрены результаты компенсации высших гармоник в спектре тока трехфазного мостового выпрямителя [3].

### Характеристики адаптивных алгоритмов

Алгоритм	Вычислительная процедура ( $k$ – число итераций)	Вычислительная сложность
Наименьших средних квадратов (LMS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \eta e_k X_k$	2N сложений, 2N умножений
Нормализованный алгоритм средних квадратов (NLMS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \frac{\eta}{\delta + X_k^+ X_k} X_k e_k$	3N сложений, 3N умножений, деление
Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов (RLS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + g_k e_k$ $g_k = \frac{R_k^{-1} X_k}{\lambda + R_k^{-1} X_k^+ X_k}$ $R_{k+1}^{-1} = \lambda^{-1} [R_k^{-1} - g_k X_k^+ R_k^{-1}]$	$2N^2 + 3N$ сложений, $3N^2 + 3N$ умножений, деление

*Примечание.*  $W_k$  – весовые коэффициенты;  $X_k$  – входной вектор;  $e_k$  – ошибка обучения;  $\lambda$  – коэффициент забывания;  $\eta$  – шаг сходимости;  $R_k^{-1}$  – матрица, вычисляемая рекурсивно на каждой итерации;  $g_k$  – вектор коэффициентов Калмана, являющийся по существу набором переменных шагов сходимости для каждого весового коэффициента;  $\delta^2$  – малое действительное число;  $\delta^2 \geq 0,01\sigma_x^2$ ;  $\sigma_x^2$  – дисперсия входного сигнала адаптивного фильтра.

Спектр сигнала, поступающего на основной вход фильтра, показан на рис. 1. Коэффициент гармоник сигнала, поступающего на основной вход  $\text{THD}_I = 24,36\%$ . Спектр восстановленного сигнала показан на рис. 2. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала  $\text{THD}_I = 5,18\%$ .

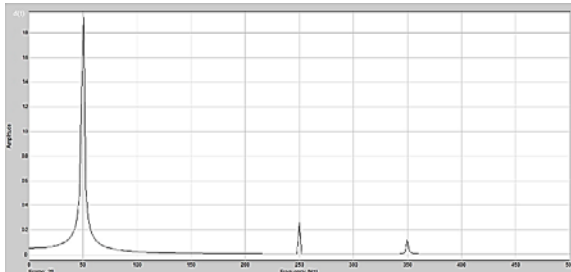


Рис. 1. Спектр сигнала на основном входе адаптивного фильтра



Рис. 2. Спектр восстановленного сигнала адаптивного фильтра

Результаты имитационного моделирования показали, что система управления активного фильтра на основе адаптивной фильтрации с нормализованным алгоритмом средних квадратов в качестве настройки весовых коэффициентов эффективно подавляет высшие гармоники несинусоидального тока. Это позволяет уменьшать  $\text{THD}_I$  с 24,36 до 5,18 %.

#### Л и т е р а т у р а

1. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения : монография / Н. П. Боярская [и др.] ; под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
2. Боярская, Н. П. Адаптивная система формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник / Н. П. Боярская, А. М. Дербенев, В. П. Довгун // Ползун. вестн. – 2011. – № 2/1. – С. 25–29.
3. Первененок, Р. Е. Фазовая синхронизация в системе коррекции параметров питающего напряжения методом адаптивной фильтрации / Р. Е. Первененок, А. Л. Сицко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 212–219.

УДК 621.9.014

### КВАДРУПОЛЬНАЯ КОМПОНОВКА ДЛЯ КРУПНОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО ГИБРИДНОГО СТАНКА

С. С. Довнар<sup>1</sup>, А. Д. Лапука<sup>1</sup>, С. В. Резник<sup>2</sup>, А. В. Федорец<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск

<sup>2</sup>ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «МЗОР», г. Минск, Республика Беларусь

Работа направлена на развитие аддитивно-субтрактивных (гибридных) станков. Станки должны нести как субтрактивные (снимающие стружку) модули, так и аддитивные модули (например, лазерные головки). Обсуждаются крупногабаритные станки, компоновки которых обычно включают стойки, колонны, башни. Работа опирается на концепцию бионической бетонной башни (БББ) [1, 2]. Концепция рекомендована прежде всего для станкостроения. Материалом для башен может быть фибробетон UHPFRC.