

УДК 621.314

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ*

О. В. Нос, С. В. Брованов, М. А. Дыбко

*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: nos@corp.nstu.ru*

Представлены результаты синтеза алгоритмов управления активным силовым фильтром, функционирующим в режиме безынерционного источника тока, практическое применение которых позволяет существенно улучшить качество потребляемой электрической энергии в случае нелинейной нагрузки произвольного вида с одновременной возможностью генерации реактивной мощности по основной гармонике.

Ключевые слова: алгоритм активной фильтрации, мгновенная мощность, кватернион токов компенсации.

DOI: 10.15372/AUT20160605

Введение. Широкое применение полупроводниковых преобразовательных устройств в составе промышленного оборудования различного назначения, вычислительной и копировальной техники, приборов бытового назначения и т. д. в силу явно выраженного нелинейного характера протекающих процессов вызывает искажения в мгновенной форме синусоидальных токов и напряжений питающей сети, что, в свою очередь, приводит к росту расходов на электроэнергию и дополнительному нагреву элементов распределительной сети [1–3]. В этой связи для повышения энергоэффективности трёхфазных систем электроснабжения общего и специального назначений необходимо полностью или частично компенсировать неактивные составляющие мгновенной мощности. Одним из практических путей реализации данного требования является установка активного силового фильтра (АСФ) [4–7], осуществляющего заданное предискажение несимметричных и/или нелинейных токов или напряжений источника [8].

Данная работа посвящена вопросам синтеза законов управления АСФ, выполненного в рамках кватернионного представления трёхфазных переменных, обеспечивающих синусоидальный закон изменения во времени сетевых токов с нулевым или опережающим/отстающим угловым сдвигом при одновременном соблюдении условия симметрии по мгновенным значениям.

Кватернион мгновенной мощности. Основной недостаток разработанных в настоящее время различных подходов к формированию компенсационных воздействий на выходе АСФ заключается в необходимости выполнения большого объёма вычислительных операций [9], что, в свою очередь, приводит к усложнению системы управления и, как следствие, удорожанию и снижению надёжности устройства в целом. Для упрощения

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 1319 «Разработка активных силовых фильтров и алгоритмов управления ими для компенсации неактивной мощности при передаче, распределении и потреблении электрической энергии»).

Правила произведения кватернионных единиц

Кватернионные единицы	1	\mathbf{q}_1	\mathbf{q}_2	\mathbf{q}_3
1	1	\mathbf{q}_1	\mathbf{q}_2	\mathbf{q}_3
\mathbf{q}_1	\mathbf{q}_1	-1	\mathbf{q}_3	$-\mathbf{q}_2$
\mathbf{q}_2	\mathbf{q}_2	$-\mathbf{q}_3$	-1	\mathbf{q}_1
\mathbf{q}_3	\mathbf{q}_3	\mathbf{q}_2	$-\mathbf{q}_1$	-1

структуры алгоритма активной фильтрации выгоднее воспользоваться нетрадиционным подходом к математическому описанию процесса энергопотребления по мгновенным значениям, основанным на применении кватернионов [10]

$$\mathbf{\Lambda} = \lambda_0 \circ 1 + \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3, \quad (1)$$

где « \circ » — символ умножения; $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — вещественные коэффициенты; $1, \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ — одна вещественная и три мнимые единицы соответственно, для которых постулируются 16 правил умножения, сведённых в таблицу.

Представив токи и напряжения в форме гиперкомплексного числа (1) при использовании равенств [11] $\lambda_0 = 0, \lambda_1 = x_A, \lambda_2 = x_B, \lambda_3 = x_C$, где x_A, x_B, x_C — мгновенные значения переменных в фазах A, B, C соответственно, кватернион мгновенной мощности находим как [7, 12]

$$\mathbf{P}_{ABC} = \mathbf{U}_{ABC} \circ \mathbf{I}_{ABC} = \text{scal}\mathbf{P}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC}. \quad (2)$$

Здесь $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}, \text{vect}\mathbf{P}_{ABC}$ — скалярная (вещественная) и векторная (мнимая) части: $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} = p_{ABC} \circ 1, \text{vect}\mathbf{P}_{ABC} = q_A \circ \mathbf{q}_1 + q_B \circ \mathbf{q}_2 + q_C \circ \mathbf{q}_3$ с вещественными коэффициентами [13] $p_{ABC} = -u_A i_A - u_B i_B - u_C i_C, q_A = u_B i_C - u_C i_B, q_B = u_C i_A - u_A i_C, q_C = u_A i_B - u_B i_A$. Как видно из (2), $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}$ и $\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}$ располагаются в отдельных подпространствах с размерностями 1 и 3 соответственно, что позволяет выполнить декомпозицию общего потока электрической энергии в единицу времени на «активную» и «реактивную» составляющие по мгновенным значениям [11].

Синтез алгоритмов активной фильтрации. Как показывает многолетний зарубежный опыт эксплуатации АСФ на промышленных предприятиях машиностроительного профиля и металлургии, тяговых подстанциях железнодорожного транспорта, объектах инфраструктуры городского коммунального хозяйства и т. д., наибольшее распространение на практике получили алгоритмы активной фильтрации, основанные на формировании компенсационных воздействий в форме токов [1, 2, 6]. Такие воздействия применительно к данному способу математического описания трёхфазных переменных вычисляются по формуле [11]

$$\mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\mathbf{P}_c - \Delta\bar{p}) = i_{cA} \circ \mathbf{q}_1 + i_{cB} \circ \mathbf{q}_2 + i_{cC} \circ \mathbf{q}_3, \quad (3)$$

где \mathbf{P}_c — компенсируемый кватернион неэффективной (неактивной) мгновенной мощности: $\mathbf{P}_c = \text{scal}\mathbf{P}_c + \text{vect}\mathbf{P}_c = p_c \circ 1 + q_{cA} \circ \mathbf{q}_1 + q_{cB} \circ \mathbf{q}_2 + q_{cC} \circ \mathbf{q}_3$; $\|\mathbf{U}_{ABC}\| = u_A^2 + u_B^2 + u_C^2$ — норма кватерниона напряжений; $\Delta\bar{p}$ — скалярная гиперкомплексная переменная, отвечающая за активные потери в силовых цепях компенсации [14].

В результате выходные токи АСФ будут описываться следующим законом управления:

$$\begin{aligned} i_{cA} &= \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (u_C \circ q_{cB} - u_B \circ q_{cC} - u_A \circ (\text{scal}\mathbf{P}_c - \Delta\bar{p}_c)), \\ i_{cB} &= \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (u_A \circ q_{cC} - u_C \circ q_{cA} - u_B \circ (\text{scal}\mathbf{P}_c - \Delta\bar{p}_c)), \\ i_{cC} &= \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (u_B \circ q_{cA} - u_A \circ q_{cB} - u_C \circ (\text{scal}\mathbf{P}_c - \Delta\bar{p}_c)). \end{aligned}$$

В зависимости от конкретного вида \mathbf{P}_c структура алгоритма (3) может принимать различные модификации. Например, как показало аналитическое исследование правой части (2) применительно к различным типам нагрузок, в том числе и с нелинейными элементами [12], любая амплитудная или фазовая асимметрия, а также искажения в мгновенной форме синусоидальных сигналов приводят к появлению $\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}$ с одновременным возникновением мультигармонических колебаний в $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}$ относительно среднего значения, отвечающего за «полезную» мощность преобразования энергии на стороне потребителя и активные потери. Используя данные компоненты в качестве базовых составляющих \mathbf{P}_c , кватернион токов компенсации (3) примет вид

$$\mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC} - \Delta\bar{p}). \quad (4)$$

Здесь $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$ — переменная составляющая скалярной части $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}$, получаемая с помощью организации в составе управляющего блока АСФ специальной подсистемы, динамика которой в наиболее общем случае описывается следующим дифференциальным уравнением в операторной форме [11]:

$$\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC} = \text{scal}\mathbf{P}_{ABC} - \text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} = (1 - W(p))\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}, \quad (5)$$

где p — оператор дифференцирования; $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC}$, $\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$ — входной сигнал и его постоянная составляющая; $W(p)$ — передаточная функция без форсирующих свойств с характеристическим полиномом [7] $D(p) = p^n + A_{n-1}\Omega p^{n-1} + \dots + A_1\Omega^{n-1}p + \Omega^n$, здесь A_f , $f = \bar{1}, n - \bar{1}$, — коэффициенты формы; Ω — среднегеометрический корень, определяющий быстродействие переходных процессов выходной переменной $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$.

В итоге, воспользовавшись промежуточным равенством $\text{scal}\mathbf{P}_{ABC} + \text{vect}\mathbf{P}_{ABC} = \mathbf{P}_{ABC} - \text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$ с учётом формул (2) и (5), получим более простую структуру алгоритма активной фильтрации [13]:

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{ABC} + \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c), \quad (6)$$

в результате чего кватернион токов источника $\mathbf{I}_s = i_{sA} \circ \mathbf{q}_1 + i_{sB} \circ \mathbf{q}_2 + i_{sC} \circ \mathbf{q}_3$ будет подчиняться аналитической зависимости [7]

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}) \circ \mathbf{U}_{ABC},$$

т. е. однозначно определяться мгновенной формой вещественных коэффициентов \mathbf{U}_{ABC} и качеством процессов получения текущей информации о $\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$. В частном случае при симметричной системе питающего напряжения

$$\begin{cases} u_A = u_m \cos \omega t, \\ u_B = u_m \cos(\omega t - 120^\circ), \\ u_C = u_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

(u_m — амплитуда гармонического сигнала с угловой частотой $\omega = 100\pi \text{ с}^{-1}$), для которой справедливо равенство

$$\|\mathbf{U}_{ABC}\| = \frac{3}{2} u_m^2, \quad (8)$$

из состава \mathbf{I}_s будут исключены обратная и нулевая последовательности фаз по всем членам разложения в ряд Фурье:

$$\mathbf{I}_s = i_{sm} \cos \omega t \circ \mathbf{q}_1 + i_{sm} \cos(\omega t - 120^\circ) \circ \mathbf{q}_2 + i_{sm} \cos(\omega t + 120^\circ) \circ \mathbf{q}_3,$$

где i_{sm} — максимальное мгновенное значение: $i_{sm} = -\frac{2}{3} \circ \frac{\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c}{u_m}$.

Режим генерации реактивной энергии. Конечная цель практического использования алгоритмов активной фильтрации высших гармоник, представленная в виде требования обеспечения симметричного синусоидального закона изменения во времени потребляемых от сети токов с нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующего напряжения, может быть дополнена вспомогательным условием, заключающимся в функционировании АСФ в режиме источника реактивной мощности ёмкостного типа, которая реализуется путём дополнения правой части (4) векторной компонентой [7] $\Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_c = Q_c \circ (\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3)$, где Q_c — вещественный коэффициент, отвечающий за желаемое угловое смещение φ :

$$Q_c = \frac{\sqrt{3}}{2} u_m i_{sm} \sin \varphi, \quad (9)$$

в результате чего, например, правая часть (6) преобразуется к виду

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{ABC} + \|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c - \Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_c), \quad (10)$$

откуда

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{ABC} - \mathbf{I}_c = -\|\mathbf{U}_{ABC}\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p} - \Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_c). \quad (11)$$

Для получения аналитической зависимости, связывающей между собой заданный параметр управления φ с элементами кватерниона мгновенной мощности источника после вступления в работу АСФ, воспользуемся уравнением [13] $\|\mathbf{P}\| = \|\mathbf{I}\| \circ \|\mathbf{U}\| = \|\text{scal}\mathbf{P}\| + \|\text{vect}\mathbf{P}\|$, которое с учётом формул (8), (9) и (11) можно также представить в форме квадратичных функций:

$$\frac{3}{2} i_{sm}^2 = \frac{2}{3u_m^2} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c)^2 + \frac{2}{u_m^2} \circ Q_c^2.$$

В итоге, выражая амплитудное значение после компенсации как $i_{sm} = \frac{2}{3u_m} \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c) \circ \cos^{-1} \varphi$ и выполняя его подстановку в (9), получим [13]

$$\Delta\text{vect}\bar{\mathbf{P}}_c = \frac{\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c}{\sqrt{3}} \circ \text{tg } \varphi \circ (\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3).$$

Таким образом, при формировании на выходе АСФ компенсационных воздействий в соответствии с законом управления (10), который применительно к каждой фазе имеет следующий вид:

$$i_{cA} = i_A + \frac{2}{3} u_m^{-2} \circ (u_A \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c) - Q_c \circ (u_B - u_C)),$$

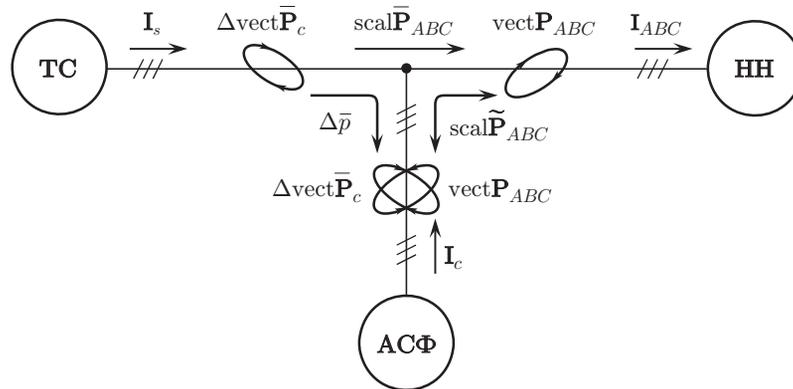


Рис. 1. Графическая иллюстрация принципа действия АСФ

$$i_{cB} = i_A + \frac{2}{3} u_m^{-2} \circ (u_B \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c) - Q_c \circ (u_C - u_A)),$$

$$i_{cC} = i_C + \frac{2}{3} u_m^{-2} \circ (u_C \circ (\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC} + \Delta\bar{p}_c) - Q_c \circ (u_A - u_B)),$$

удаётся добиться опережающего коэффициента мощности при гармонической форме мгновенных сигналов i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} .

В качестве иллюстрации принципа действия АСФ в составе трёхфазной системы с нагрузкой произвольного вида **НН**, подключённой к источнику бесконечной мощности **ТС**, на рис. 1 графически представлено распределение мгновенных мощностей в четырёхмерном гиперкомплексном пространстве при использовании закона управления (10). Обобщённая функциональная схема управляющего устройства приведена на рис. 2, где **ФНЧ** — динамическая подсистема выделения постоянной составляющей $\text{scal}\bar{\mathbf{P}}_{ABC}$, описываемая дифференциальным уравнением (5) [7]; **РН** — ПИ-регулятор напряжения звена постоянного тока, формирующий на выходе скалярную гиперкомплексную величину $\Delta\bar{p}_c$ и осуществляющий предварительный заряд силовой ёмкости в составе АСФ с последующей стабилизацией напряжения u_{dc} на желаемом уровне $u_{dc}^* = \text{const}$ [14].

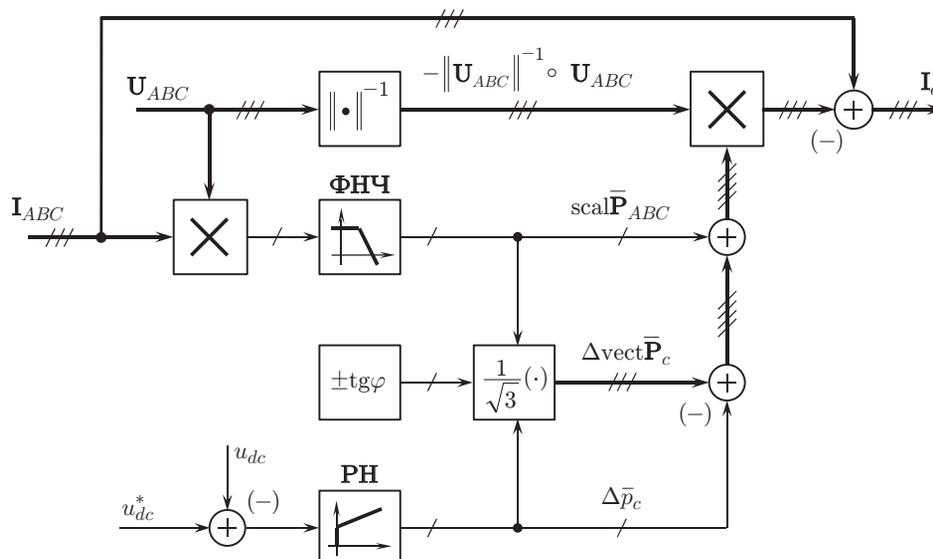


Рис. 2. Функциональная схема системы формирования токов компенсации вида (10)

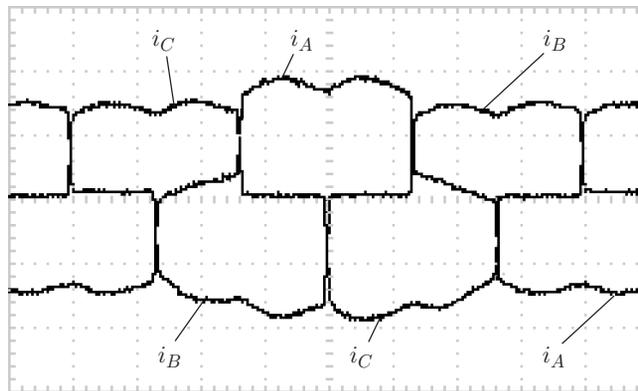


Рис. 3. Трёхфазные токи, потребляемые из сети несимметричным мостовым выпрямителем с RL-нагрузкой

Отличие изображённой на рис. 2 структуры трёхканального блока формирования \mathbf{I}_c от алгоритмов активной фильтрации [7, 13] заключается в непосредственном преобразовании «неэффективных» составляющих кватерниона мгновенной мощности $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{ABC}$ и $\text{vect}\mathbf{P}_{ABC}$ в соответствующие компенсационные воздействия i_{cA} , i_{cB} , i_{cC} без промежуточного разделения \mathbf{I}_{ABC} на активную и реактивную компоненты с использованием полосовых фильтров, что в конечном итоге позволяет снизить требования к быстродействию и производительности, предъявляемые к программно-аппаратной части системы управления АСФ.

В качестве иллюстрации работоспособности предложенного подхода к исключению негативного влияния параметрической асимметрии цепей и искажений в мгновенной форме сигналов на качество процессов потребления электрической энергии на рис. 3 и 4 представлены результаты экспериментального исследования трёхфазной системы с нелинейной нагрузкой и АСФ, реализованного на базе двухуровневого автономного инвертора с частотой коммутации полупроводниковых ключей 2,7 кГц. Как видно из рис. 4, после вступления в работу силового преобразовательного устройства активной фильтрации с алгоритмом компенсации вида (6) измеренный с коэффициентом передачи $k_i = 0,18 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1}$ сетевой ток фазы A имеет нулевое угловое смещение относительно соответствующего напряжения ($k_u = 0,01$) и в его спектре преобладает основная гармоника.

Также необходимо отметить, что дальнейшего улучшения мгновенной формы сигналов i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} можно добиться за счёт увеличения полосы пропускания регулируемого

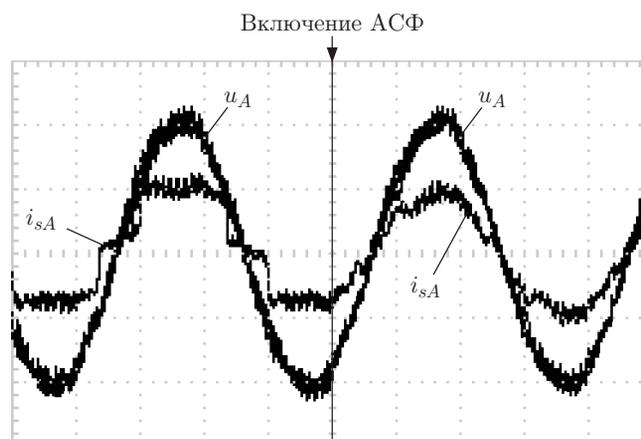


Рис. 4. Ток и напряжение фазы A источника до и после включения в работу АСФ

источника токов компенсации \mathbf{I}_c , а при отклонении сетевого напряжения от системы уравнений (7) в законах управления (4), (6) и (10) необходимо использовать прямую последовательность фаз u_A, u_B, u_C с частотой $\omega = 100\pi \text{ с}^{-1}$, получаемую с помощью совместного применения полосовых и фазосдвигающих фильтров [8].

Заключение. На основании представленных в данной работе результатов синтеза алгоритмов активной фильтрации, работоспособность и эффективность которых была подтверждена проведёнными экспериментальными исследованиями [7, 11, 13], можно заключить, что практическое применение разработанных в рамках алгебры кватернионов структур системы управления АСФ позволит обеспечить частичную или полную (до нормированной гармоники) фильтрацию сетевых токов с одновременной возможностью генерации реактивной энергии по аналогии со статическим синхронным компенсатором STATCOM [1]. Техническая реализация последнего режима даст возможность отказаться от использования конденсаторных батарей как пассивного корректирующего устройства и таким образом добиться более качественного процесса компенсации мощности сдвига за счёт перехода к плавному регулированию, а также повысить надёжность энергосистемы путём исключения резонансных явлений. При этом, как видно из рис. 2, формирование кватерниона выходных токов \mathbf{I}_c осуществляется без какого-либо ортогонального преобразования исходного базиса, что в итоге позволяет снизить требования к производительности и объёму памяти программно-аппаратных средств управляющей части АСФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M.** Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. N. Y.: Wiley-IEEE Press, 2007. 379 p.
2. **Trinh Q.-N., Lee H.-H.** An advanced current control strategy for three-phase shunt active power filters // IEEE Trans. Ind. Electron. 2013. **60**, Is. 12. P. 5400–5410.
3. **Pereira R. R., da Silva C. H., da Silva L. E. B. et al.** New strategies for application of adaptive filters in active power filters // IEEE Trans. Ind. Appl. 2011. **47**, Is. 3. P. 1136–1141.
4. **Tang Y., Loh P. C., Wang P. et al.** Generalized design of high performance shunt active power filter with output LCL filter // IEEE Trans. Ind. Electron. 2012. **59**, Is. 3. P. 1443–1452.
5. **Steela K., Rajpurohit B. S.** A survey on active power filters control strategies // Proc. of the IEEE 6th India Intern. Conf. on Power Electronics (IICPE). Kurukshehra, India, 2014. P. 1–6.
6. **Wang Y.-W., Wong M.-C., Lam C.-S.** Historical review of parallel hybrid active power filter for power quality improvement // Proc. of the IEEE Region 10 Conference (TENCON). Macau, Chine, 2015. P. 1–6.
7. **Nos O. V., Kharitonov S. A.** A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation // Russian Elec. Eng. 2015. **86**, Is. 2. P. 72–78.
8. **Нос О. В., Кучер Е. С., Бакляк А. В.** Алгоритмы управления последовательно-параллельными активными силовыми фильтрами // Докл. АН ВШ РФ. 2015. № 2(27). С. 77–87.
9. **Herrera R. S., Revuelta P. S., Kim H.** Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results // IEEE Trans. Ind. Electron. 2008. **55**, Is. 1. P. 184–196.
10. **Hamilton W. R.** Elements of Quaternions. N. Y.: Chelsea Publishing Company, 1969. Vol. I. 594 p.; Vol. II. 502 p.
11. **Nos O. V.** Control strategy of active power filter for ineffective instantaneous power compensation // Proc. of the 15th Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Novosibirsk: IEEE, 2014. P. 370–374.

12. **Нос О. В.** Аналитическое исследование уравнения мгновенной мощности трёхфазной нагрузки в гиперкомплексном пространстве // *Электричество*. 2015. № 5. С. 54–59.
13. **Nos O. V.** Control strategy of shunt active power filter based on algebraic approach // *Proc. of the 16th Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Novosibirsk: IEEE, 2015. P. 459–463.
14. **Nos O. V., Pankratov V. V., Shalygin K. A.** A voltage-control algorithm for a DC link of an active power filter // *Russian Elec. Eng.* 2013. **84**, Is. 12. P. 691–695.

Поступила в редакцию 15 января 2016 г.
