

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
АКТИВНЫМ СИЛОВЫМ ФИЛЬТРОМ С КОМПЕНСАЦИЕЙ
МГНОВЕННОЙ НЕЭФФЕКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Введение. Классическое решение задачи энергосбережения, заключающееся в исключении сдвига между соответствующим током и напряжением с одновременным улучшением гармонического состава фазных переменных, как правило, реализуется за счет установки пассивных RLC-цепей, имеющих большие габаритные размеры и массу, а также невысокие фильтрующие характеристики в силу существенной нелинейности современных потребителей. Другой подход к повышению энергоэффективности трехфазных систем переменного тока заключается в использовании активных силовых фильтров (АСФ), которые успешно решают широкий спектр функциональных задач, включающий в себя устранение искажений в гармонической форме токов, подавление высокочастотных составляющих, приведение коэффициента мощности к единице, симметрирование системы фазных переменных, уменьшение скачков напряжения, демпфирование резонансных явлений и т.д. [1].

Алгоритмы управления активными силовыми фильтрами. В большинстве практических применений АСФ функционирует в режиме быстродействующего регулируемого источника токов и структурно состоит из автономного инвертора напряжения, силовой конденсаторной батареи и сглаживающих выходных дросселей, подключаемых между источником (трехфазной сетью) и нелинейной несимметричной нагрузкой [2]. В свою очередь алгоритмы управления данными полупроводниковыми устройствами основываются на компенсации части составляющих уравнения баланса мгновенных мощностей, представленного в виде скалярного и векторного произведений пространственных векторов напряжений и токов после линейного ортогонального преобразования исходного базиса фазных переменных к координатным осям α, β, o [3]. Другой подход к формированию компенсационных воздействий во временной области с использованием четырехмерного гиперкомплексного пространства \mathbb{H} , дающий наглядную геометрическую и физическую интерпретации потоков энергии в системе «источник–потребитель», базируется на некоммутативной алгебре кватернионов [4].

Кватернион представляет собой специальный некоммутативный математический объект, состоящий из одной действительной 1 и трех мнимых единиц $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$

$$\mathbb{L} = \text{scal}\mathbb{L} + \text{vect}\mathbb{L},$$

где $\text{scal}\mathbb{L}$, $\text{vect}\mathbb{L}$ – скалярная (действительная) и векторная (мнимая) части соответственно

$$\text{scal}\mathbb{L} = \lambda_0 \circ 1, \text{vect}\mathbb{L} = \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3,$$

здесь $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – вещественные коэффициенты.

Воспользовавшись трехмерным подпространством \mathbb{H} из $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$, представим фазные напряжения и токи в следующем виде:

$$\mathbf{U}_{abc} = u_a \circ \mathbf{q}_1 + u_b \circ \mathbf{q}_2 + u_c \circ \mathbf{q}_3, \mathbf{I}_{abc} = i_a \circ \mathbf{q}_1 + i_b \circ \mathbf{q}_2 + i_c \circ \mathbf{q}_3,$$

откуда кватернион мгновенных мощностей находится согласно [4]

$$\mathbf{P}_{abc} = \mathbf{U}_{abc} \circ \mathbf{I}_{abc} = p_{abc} \circ 1 + q_a \circ \mathbf{q}_1 + q_b \circ \mathbf{q}_2 + q_c \circ \mathbf{q}_3, \quad (1)$$

здесь p_{abc}, q_a, q_b, q_c – вещественные коэффициенты, определяемые как

$$p_{abc} = -(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c), q_a = u_b i_c + u_c i_b, q_b = u_c i_a + u_a i_c, q_c = u_a i_b + u_b i_a.$$

Как показывает анализ правой части уравнения (1), при чисто активном потребителе с одинаковыми параметрами во всех трех фазах, \mathbf{P}_{abc} представляет собой постоянную величину $p_{abc} = \text{const}$, в результате чего в дальнейшем под кватернионом мгновенной неэффективной мощности будем понимать сумму векторной и переменной скалярной составляющих, т.е.

$$\mathbf{P}_{abc}^* = \text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{abc} + \text{vect}\mathbf{P}_{abc},$$

где $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{abc}$ – в общем случае мультигармоническая периодическая величина, отвечающая за мгновенную мощность искажения из-за наличия несимметричных и/или нелинейных элементов.

В итоге, при обратном переходе к токам получаем следующий закон формирования компенсационных воздействий на выходе АСФ

$$\mathbf{I}_c = i_{ca} \circ \mathbf{q}_1 + i_{cb} \circ \mathbf{q}_2 + i_{cc} \circ \mathbf{q}_3 = \mathbf{U}_{abc}^{-1} \circ (\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{abc} + \text{vect}\mathbf{P}_{abc} - \Delta\bar{p}), \quad (2)$$

где $\mathbf{U}_{abc}^{-1} = -(u_a^2 + u_b^2 + u_c^2)^{-1} \circ \mathbf{U}_{abc}$ – обратный кватернион фазных напряжений; $\Delta\bar{p}$ – активная мгновенная мощность потерь в цепях компенсации, отвечающая за стабилизацию напряжения конденсаторной батареи АСФ,

или окончательно в более простой форме записи [2]

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{abc} - \mathbf{U}_{abc}^{-1} \circ (\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{abc} + \Delta\bar{p}), \quad (3)$$

здесь $\text{scal}\tilde{\mathbf{P}}_{abc}$ – постоянная составляющая скалярной части кватерниона мгновенной мощности.

Экспериментальное исследование алгоритмов управления АСФ. В целях проверки работоспособности разработанных алгоритмов управления АСФ вида (2) и (3) на предприятии ЗАО “ЭРАСИБ” (г. Новосибирск) было проведено экспериментальное исследование режимов работы АСФ, реализованного на базе общепромышленного преобразователя частоты типа “ЭРАТОН–М4” с частотой коммутации полупроводниковых ключей 2,7 кГц и коэффициентами передачи датчиков тока $k_i = 0,18 \text{ В}\cdot\text{А}^{-1}$ и напряжения $k_u = 0,01$ соответственно. Сформированные при помощи управляющей программы на языке С++ компенсирующие воздействия вида (2) и (3) поступали через АЦП на вход трехканального квазинепрерывного контура регулирования выходных токов АСФ с частотой среза в разомкнутом состоянии 700 Гц.

На рис.1 и рис.2 изображены осциллограммы потребляемых от источника фазных токов нелинейной несимметричной нагрузки в системе с отключенным и работающим АСФ при амплитуде питающего напряжения 200В, а на рис.3 и рис.4 показаны временные зависимости тока и напряжения фазы a до и после включения в работу АСФ, а также соответствующее компенсирующее воздействие i_{ca} .

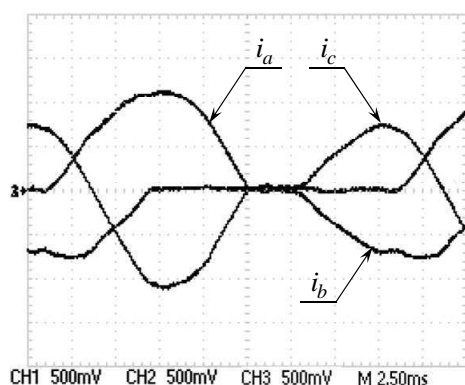


Рис.1. Потребляемые от источника токи нелинейной несимметричной нагрузки до компенсации

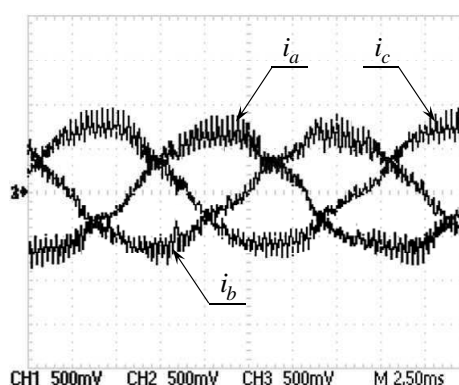


Рис.2. Потребляемые от источника токи нелинейной несимметричной нагрузки после компенсации

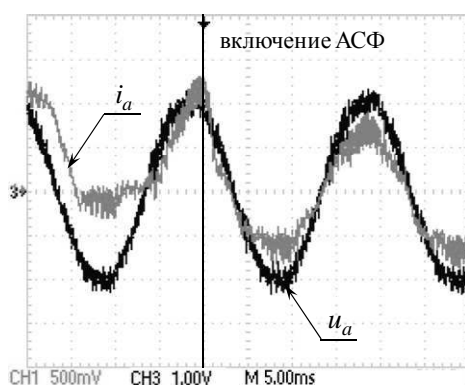


Рис.3. Ток и напряжение фазы a до и после момента включения АСФ

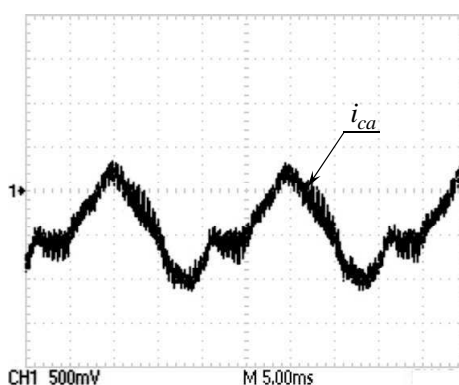


Рис.4. Компенсирующий ток фазы a на выходе АСФ в установившемся процессе

Таким образом, как видно из представленных результатов проведенного экспериментального исследования, алгоритмы компенсации вида (2) и (3) с использованием алгебры кватернионов являются эффективным средством реализации принципа энергосбережения в трехфазных системах передачи, распределения и преобразования электрической энергии переменного тока.

Литература

1. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. vol. 93, no. 12. 2005. pp. 2128–2141.
2. Нос О.В., Панкратов В.В. Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. №6. С. 33–39.
3. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press. Published by John Wiley & Sons, Inc, 2007. p. 379.
4. Нос О.В., Панкратов В.В., Шалыгин К.А. Алгоритмы управления активными силовыми фильтрами при несимметричной нелинейной нагрузке // Труды VII международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. Иваново, ИГЭУ, 2012. С. 69–74.