

УДК 621.311.004

А.А. Колб, канд.техн.наук

## СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО ПИТАНИЯ ПРИВОДОВ С ЕМКОСТНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ

**Аннотация.** Предложен усовершенствованный способ управления многофункциональными параллельными активными фильтрами для быстрой и точной компенсации неактивных составляющих полной мощности в трех- и четырехпроводных системах.

А.А.Колб, канд. техн. наук

## СИСТЕМИ ГРУПОВОГО ЖИВЛЕННЯ ПРИВОДІВ З ЄМНІСНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ І ПАРАЛЕЛЬНИМИ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ

**Анотація.** Запропоновано вдосконалений спосіб керування багатофункціональними паралельними активними фільтрами для швидкої й точної компенсації неактивних складових повної потужності в трьох і чотирьох провідних системах.

А.А. Kolb, PhD

## POWER SYSTEMS GROUP DRIVES WITH CAPACITIVE DRIVES AND PARALLEL ACTIVE FILTERS

**Abstract.** The improved method of management by multifunction parallel active filter for fast and exact indemnification of nonactive constituents of complete power in three and four wire systems is offered.

**Введение.** Поскольку электроприводы потребляют до 60 % вырабатываемой электроэнергии, а наибольшие потери имеют место у потребителя, то электроприводы обладают огромным резервом для сбережения электроэнергии. Одним из перспективных направлений энергосбережения средствами промышленного электропривода и нормализации традиционных показателей качества электроэнергии является применение систем группового питания приводов от общих шин постоянного тока с емкостными накопителями и применением параллельных активных фильтров (ПАФ) [5].

Следовательно, вопросы энергосбережения средствами промышленного привода и разработки эффективных технических средств, критериев и алгоритмов управления ими с целью повышения энергетической эффективности электропривода, передачи и потребления электроэнергии являются актуальными и важными.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Широкое применение ФКУ выявило ряд недостатков, которые вызывают дополнительное генерирование гармоник, например, вследствие резонансных явлений. При сложном спектре токов и напряжений сети делает применение ФКУ недостаточно эффективным [2].

В случае нелинейных и несимметричных динамических нагрузок требуется применение быстродействующих компенсирующих устройств для быстрой и точной разгрузки сети от негативного влияния неактивных составляющих полной мощности. Наиболее эффективными в этом направлении являются ПАФ [3-7].

**Целью работы** является усовершенствование способов управления многофункциональными ПАФ для быстрой и точной компенсации неактивных составляющих полной мощности как в трех, так и четырех проводных системах смещенного питания, адаптированных к системам группового питания приводов с емкостными накопителями энергии.

**Результаты исследования.** ПАФ (рис.1) содержит трехфазный АИН с двухсторонней проводимостью, подключенный к сети через реактор  $L_{\text{фи}}$ , предназначенный для подавления высоких частот, обусловленных коммутацией ключей инвертора. Сигналы задания тока, подлежащего компенсации, формируются блоком управления с использованием мгновенных значений реактивной мощности (мощности сдвига первых гармоник, искажения и несимметрии).

Контуры тока замыкаются через релейные регуляторы (РРТ) с ограничением частоты коммутации ключей инвертора. РРТ представляют собой простую и надежную в работе схему, обладающую предельным быстродействием при заданных энергетических ограничениях в звене постоянного тока.

На практике наиболее часто используются два метода управления ПАФ. Метод мгновенной мощности (p-q теория) и метод управления в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по обобщенному (результатирующему) вектору напряжения сети [6-8], основанный на прямом и обратном преобразованиях Парка-Горева.

В первом случае постоянные  $p_n$ ,  $q_n$  и переменные  $p_v$ ,  $q_v$  составляющие мгновенной мощности определяются согласно зависимости

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_n \\ q_n \\ p_{0n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_v \\ q_v \\ p_{0v} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & 0 \\ -u_\beta & u_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В приведенном выражении ортогональные составляющие в неподвижной системе координат  $\alpha$ - $\beta$ ,

например, обобщенного вектора напряжения сети определяются [8]

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

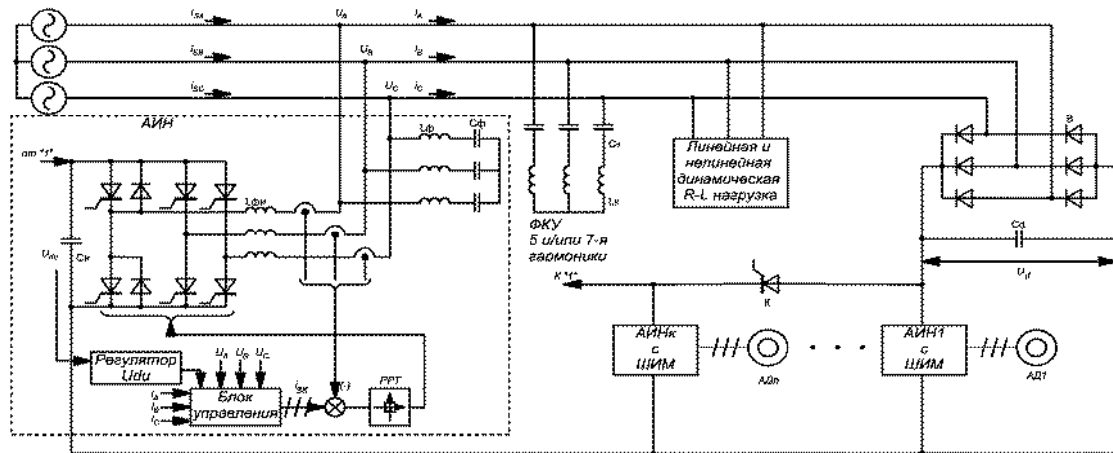


Рис. 1. Функциональная схема параллельного активного фильтра (ПАФ) адаптированная к системе группового питания приводов с емкостными накопителями  $C_d$  электроэнергии

помощью ПАФ могут решаться различные задачи: компенсация всех неактивных составляющих; отдельных составляющих или их различные комбинации. Для этого сигналы мгновенной мощности  $p$  и  $q$  подвергаются фильтрации с помощью ФНЧ с целью разделения их на составляющие для формирования требуемого управляющего параметра компенсации  $p^*$  и  $q^*$  (рисунки 2 и 3). Токи задания компенсатора в осях  $\alpha$ - $\beta$  вычисляются на основании  $p^*$  и  $q^*$  и составляющих  $u_\alpha$ ,  $u_\beta$  напряжения сети в точке подключения ПАФ [8]

$$\begin{bmatrix} i_{k\alpha}^* \\ i_{k\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В трехфазной системе координат задание токов компенсации определяется [6]

$$\begin{bmatrix} i_{ka}^* \\ i_{kb}^* \\ i_{kc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0,5 & \sqrt{3}/2 \\ -0,5 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{k\alpha}^* \\ i_{k\beta}^* \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В предельном случае ПАФ должен генерировать в нагрузку все неактивные составляющие полной мощности. Однако в комбинированных системах могут использоваться конденсаторные батареи и ФКУ, (например 5 и/или 7-й гармоник) для компенсации части реактивной мощности (рис.1). Поэтому с

В случае искажения формы напряжения сети высшими гармониками и асимметрией нагрузки для повышения точности компенсации неактивных составляющих мощности в систему управления вводится фильтр Ф1 для выделения основной гармоники прямой последовательности (рис. 1).

Функциональная схема управления ПАФ по методу  $p$ - $q$  теории мгновенной мощности приведена на рис.2. Требуемая активная мощность, потребляемая ПАФ, для компенсации потерь и поддержания напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне формируется в виде двух сигналов. Первый из них соответствует переменной составляющей  $p_v$ , а второй – выходному сигналу регулятора напряжения (РН) в звене постоянного тока.

В схеме предусмотрено несколько режимов компенсации реактивной мощности: полная компенсация; компенсация отдельных составляющих или их комбинация. Использование узкополосного фильтра для выделения переменных составляющих двойной частоты позволяет симметризовать нагрузку.

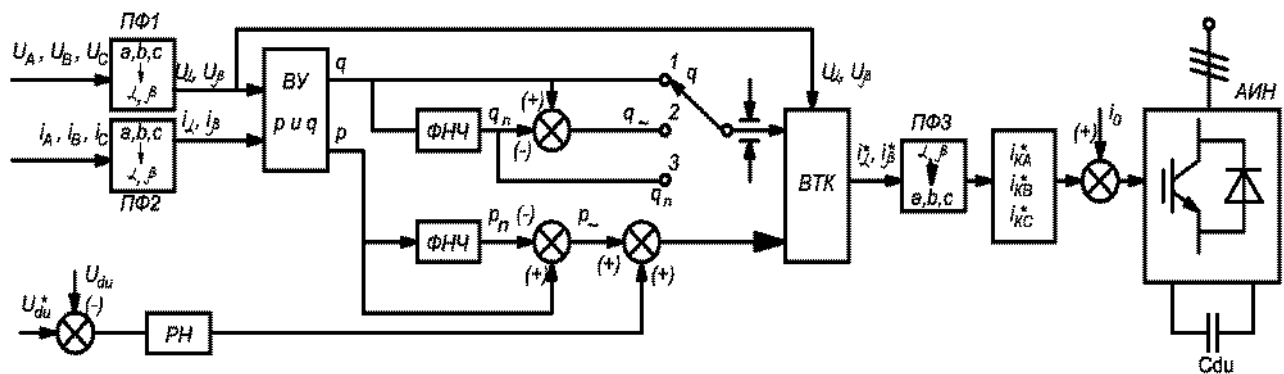


Рис. 2. Функциональная схема управления ПАФ в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  (ВТК – вычислитель токов компенсации по (4); ВУ – вычислительное устройство)

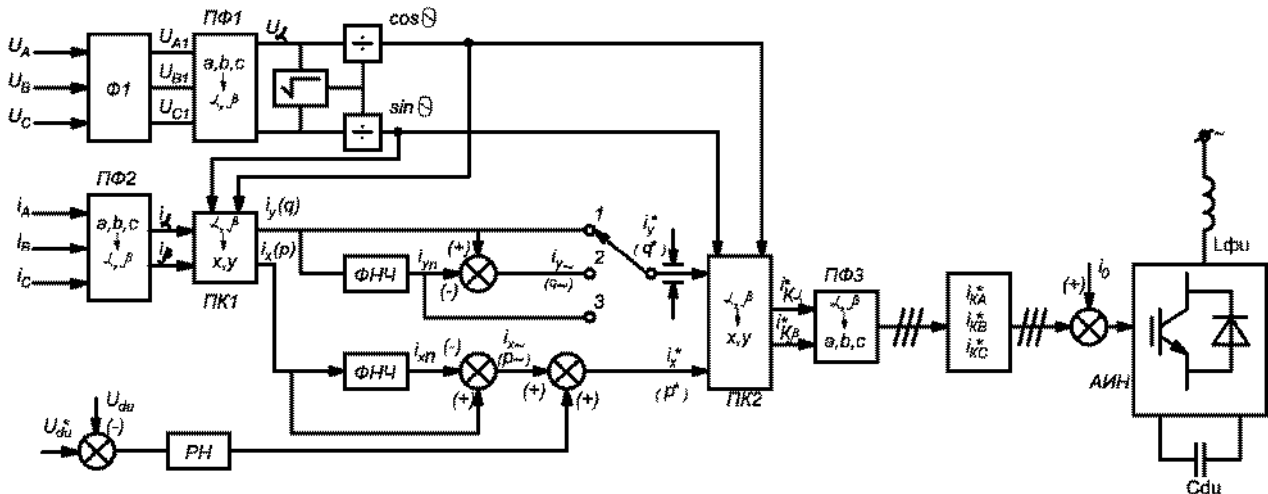


Рис. 3. Функциональная схема управления ПАФ с использованием синхронно вращающейся системы координат (метод  $x, y$  теории мгновенной мощности)

Общим недостатком метода  $p-q$  теории мгновенной мощности является использование гармонических переменных  $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$  при вычислении задающих токов компенсации согласно (3) и (4), что снижает помехоустойчивость системы и усложняет алгоритм вычисления. Компьютерное моделирование режимов работы ПАФ (рис.3) показало, что управление им в синхронно вращающейся системе координат  $x-y$ , ориентированной по обобщенному вектору напряжения сети, позволяет упростить процедуру выделения и непрерывного контроля неактивных составляющих полной мощности, увеличить быстродействие и точность компенсации. Этот способ базируется на прямом и обратном преобразованиях Парка-Горева.

Прямое преобразование заключается в определении проекций результирующего вектора тока на оси  $x-y$  [4-8]

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $\theta = \omega t$  - пространственное положение вращающейся координатной системы, определяемое

$$\cos \theta = u_\alpha / U, \quad \sin \theta = u_\beta / U, \quad U = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}. \quad (6)$$

Существенно, что составляющая  $i_y$  и переменная  $i_{xv}$  соответствуют неактивным составляющим токов, подлежащих компенсации. Как и в схеме рис.2, используется ФНЧ для разделения  $i_x, i_y$  на постоянные и переменные составляющие.

Обратное преобразование с вращающейся системы координат в неподвижную [4]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Задание на токи компенсации формируется путем перехода от двухфазной системы координат к трехфазной и добавлением тока нулевой последовательности  $i_0$ :

$$\begin{aligned} i_a &= i_\alpha + i_0, \\ i_b &= -\frac{i_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta + i_0, \\ i_c &= -\frac{i_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta + i_0 \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, если к трехфазной системе переменных применить сначала прямое преобразование Кларка, а затем преобразование Парка-Горева, то проекция обобщенного вектора тока на ось  $y$  и переменная составляющая проекции на ось  $x$  соответствуют неактивным составляющим токов, подлежащих компенсации для минимизации потребления реактивной мощности. Причем и в этом случае используя ФНЧ, можно реализовать различные режимы компенсации.

Результаты моделирования некоторых режимов работы ПАФ приведены на рис.4. В схемах управления ПАФ (рис.2,3) предусмотрено ограничение максимального значения компенсируемой реактивной мощности для защиты его от перегрузок и возможной разрядки конденсатора.

Следует особо подчеркнуть, что формирование управляющего параметра ПАФ согласно (8) не требует применения дополнительных устройств для компенсации тока нулевой последовательности в четырехпроводных системах.

#### Выводы

1. В синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по обобщенному вектору напряжения сети, значительно упрощается процедура формирования параметра управления ПАФ, а применение релейного управления повышает быстродействие компенсатора до предельно возможных значений при имеющихся энергетических ограничениях.

2. Добавление тока нулевой последовательности в токи задания компенсации позволяет использовать ПАФ как в трех-, так и четырехпроводных системах без дополнительных устройств компенсации тока нулевой последовательности.

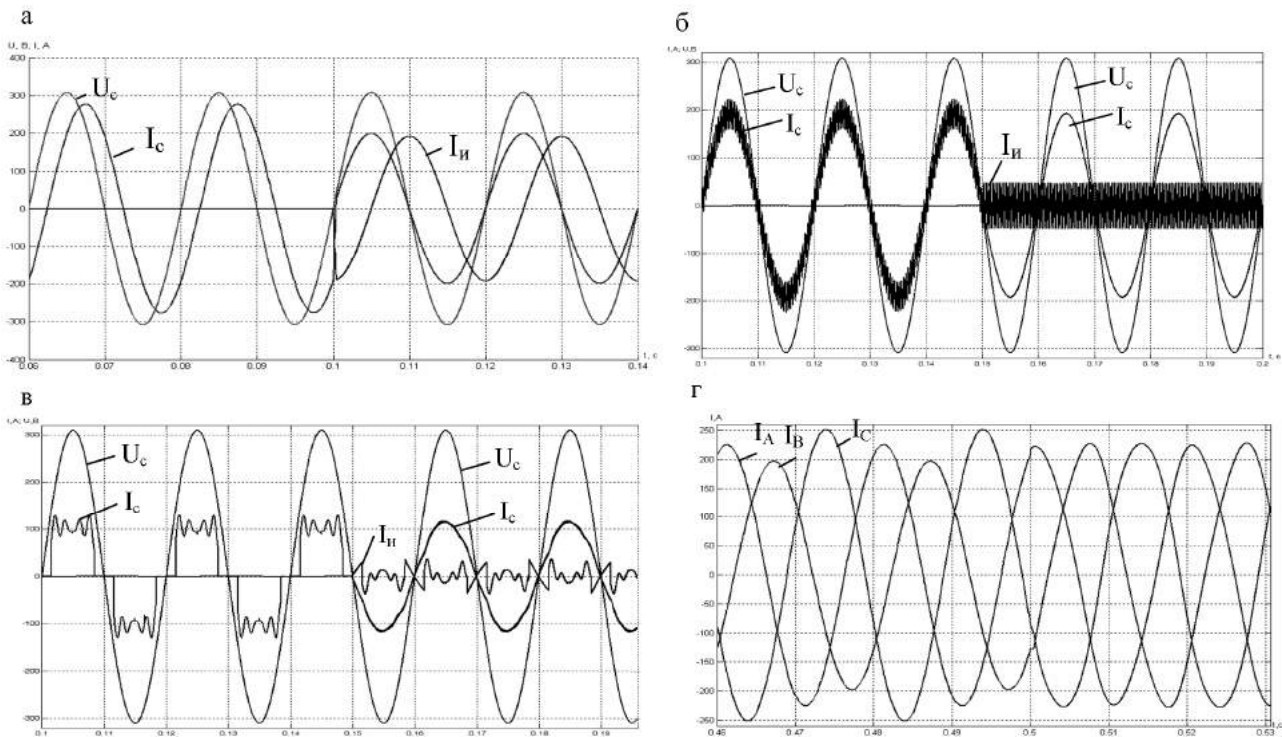


Рис.4. Компенсация реактивной мощности (а); 49-й гармоники (б); неактивных составляющих мощности диодного выпрямителя в системах группового питания приводов (в); симметрирование нагрузки (г)

#### Список использованной литературы

1. Волков А. В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования активно-го фильтра / А.В. Волков // *Электротехника*, 2002, №12. –С.40-48.
2. Жежеленко В.И. Высшие гармоники в системах энергоснабжения предприятий / В.И. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331с.
3. Ивакин В.Н. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике / В.Н. Ивакин, В.Д. Ковалев // *Электричество*, 2001. № 9.– С.30 -37.
4. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац – Пер.с нем.- М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
5. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с емкостными накопителями энергии /А.А. Колб // *Вісн. КДПУ.- Кременчуг*: – 2003. – Вып.1. – С.135-143.
6. Колб А.А. Управление компенсаторами неактивных составляющих полной мощности на основе АИН с ШИМ / А.А. Колб // *Наук. Вісн. НГУ . – Дн-ськ. – 2008. – № 1. – С.82-86.*
7. В. Singh Обзор активных фильтров для повышения качества электроэнергии / В. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra // *IEEE Trans. Ind. Elektron*, vol.46, No.5, 1999, pp.960-971.
8. Н. Akagi Теория мгновенной мощности и ее применение для повышения качества электроэнергии / Н. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes // *IEEE Press Series on Power Engineering*, New York, Wiley, 2007.

Получено 08.07.2011



Колб Андрей Антонович,  
к.т.н., доц. каф. эл. машин  
Нац. горного ун-та,  
49005, Днепропетровск,  
пр. К.Маркса 19,  
тел. 056-373-0770,  
E-mail: aakolb@gmail.com