

*А. А. Колб, канд техн. наук*

*(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ КОМПЕНСАТОР

**Введение.** Надежное электроснабжение потребителей качественной электроэнергией в значительной степени зависит от применения современных автоматических быстродействующих систем управления неактивными составляющими полной мощности на основе АИН с ШИМ. Системы управления качеством электроэнергии, построенные по принципу замкнутых систем автоматического регулирования, обладают более широкими функциональными возможностями.

**Целью настоящей работы** является разработка и синтез системы управления усовершенствованным ПАФ на основе критерия минимума полной мощности с использованием  $I_x$ ,  $I_y$  теории мгновенной мощности в обобщенных векторах напряжения и тока в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети.

**Результаты исследования.** Расчетная схема и векторные диаграммы системы сеть – вентильный компенсатор в обобщенных векторах представлены на рис. 1.

На рис.1 обозначено:  $\bar{U}_C$ ,  $\bar{U}_K$  - обобщенные (результатирующие вектора) трехфазного напряжения сети и первой гармоники вентильного компенсатора;  $L_K$  - суммарная индуктивность контура, включая индуктивность рассеяния трансформатора и фильтра;  $R_K$  – эквивалентное сопротивление, учитывающее потери в контуре, включая потери в ключах инвертора;  $\bar{I}_K$  - результирующий вектор первой гармоники тока компенсатора;  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $x$ ,  $y$  – координатные оси неподвижной и синхронно вращающейся системы координат;  $\varphi_x = \omega_1 t$  – угол поворота вращающейся системы координат относительно неподвижной;  $\omega_1 = 2\pi f_1$  – угловая частота напряжения сети;  $\beta$  – фазовый сдвиг между результирующими векторами напряжения сети и компенсатора;  $I_{ка}$ ,  $I_{кр}$  – активная и реактивная (на рис. 1 - емкостная) составляющие вектора тока компенсатора по отношению к напряжению сети;  $I_x$ ,  $I_y$  – ортогональные составляющие вектора тока сети в

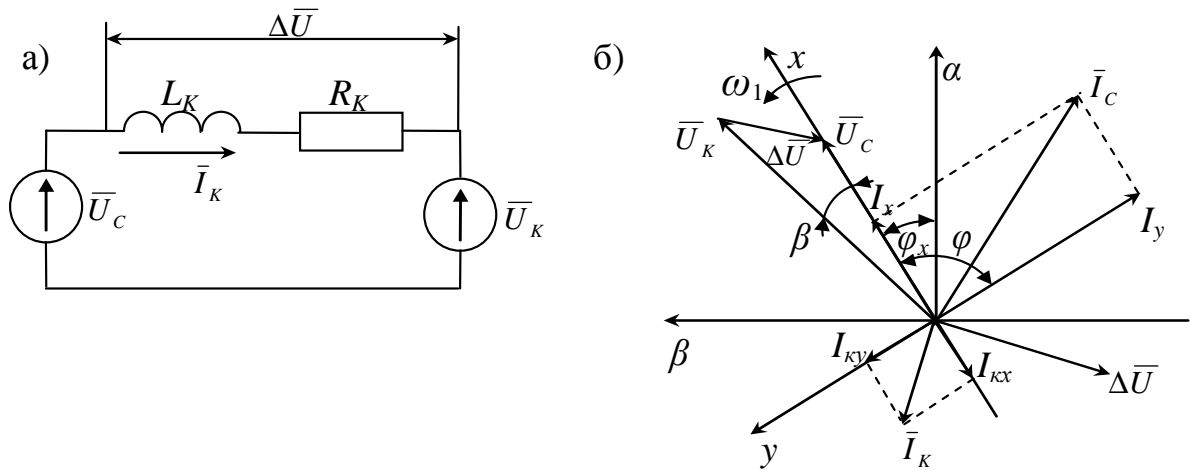


Рис. 1. Расчетная схема (а) и векторная диаграмма (б) системы сеть – компенсатор в режиме компенсации активно-реактивной мощности

синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети (постоянные составляющие которых пропорциональны соответственно активной и реактивной мощности).

Мгновенная мощность при отсутствии нулевых составляющих определяется в общем случае скалярным произведением результирующего вектора напряжения сети  $\bar{U}_C$  на сопряженный вектор тока  $\bar{I}_C^*$

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{U}_C \cdot \bar{I}_C^*], \quad (1)$$

где  $\bar{U}_C = U_\alpha + jU_\beta$ ;  $\bar{I}_C^* = I_\alpha - jI_\beta$  - обобщенный вектор напряжения сети и сопряженный вектор тока и их ортогональные составляющие.

Выражения для мгновенных значений активной и реактивной мощности, представленные в виде постоянной и переменной составляющих в матричной форме записи, имеют вид:

$$\begin{bmatrix} p = P + p_{\sim} \\ q = Q + q_{\sim} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \\ U_\beta & -U_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору напряжения сети, выражение (2) принимает вид:

$$p = P + p_{\sim} = \frac{3}{2} U_C I_x; \quad q = Q + q_{\sim} = \frac{3}{2} U_C I_y, \quad (3)$$

где  $I_x, I_y$  – ортогональные составляющие результирующего вектора тока на оси  $x, y$ ;  $U_C$  - модуль результирующего вектора напряжения сети, равный амплитудному значению фазного напряжения.

В линейных симметричных системах ортогональные составляющие  $I_x$  и  $I_y$  не содержат переменных составляющих и являются пропорциональными соответственно активной и реактивной мощности. В нелинейных и несимметричных системах указанные составляющие содержат также компоненты, зависящие как от наличия высших гармоник, так и от несимметрии нагрузки. При этом сумма составляющей  $I_y$  и переменной  $I_{x\sim}$  соответствуют неактивным составляющим тока, подлежащим компенсации. Эти составляющие, легко выделяемые (идентифицируемые) в синхронно вращающейся системе координат, могут быть использованы для непрерывного контроля мгновенных составляющих неактивной мощности и управления качеством электроэнергии на основе силовых параллельных активных фильтров (ПАФ).

Реактивная мощность, генерируемая ПАФ, определяемая как

$$Q = \frac{3(U_C - U_K \cos \beta) \cdot U_C}{2 x_\phi}, \quad (4)$$

зависит от величины и ориентации напряжения вентильного компенсатора  $U_K$ . Поэтому эффективным направлением повышения генерируемой реактивной энергии является увеличение напряжения в звене постоянного тока ПАФ. Для этой цели в схеме рис.2 используется повышающий преобразователь постоянного напряжения в постоянное (ППН).

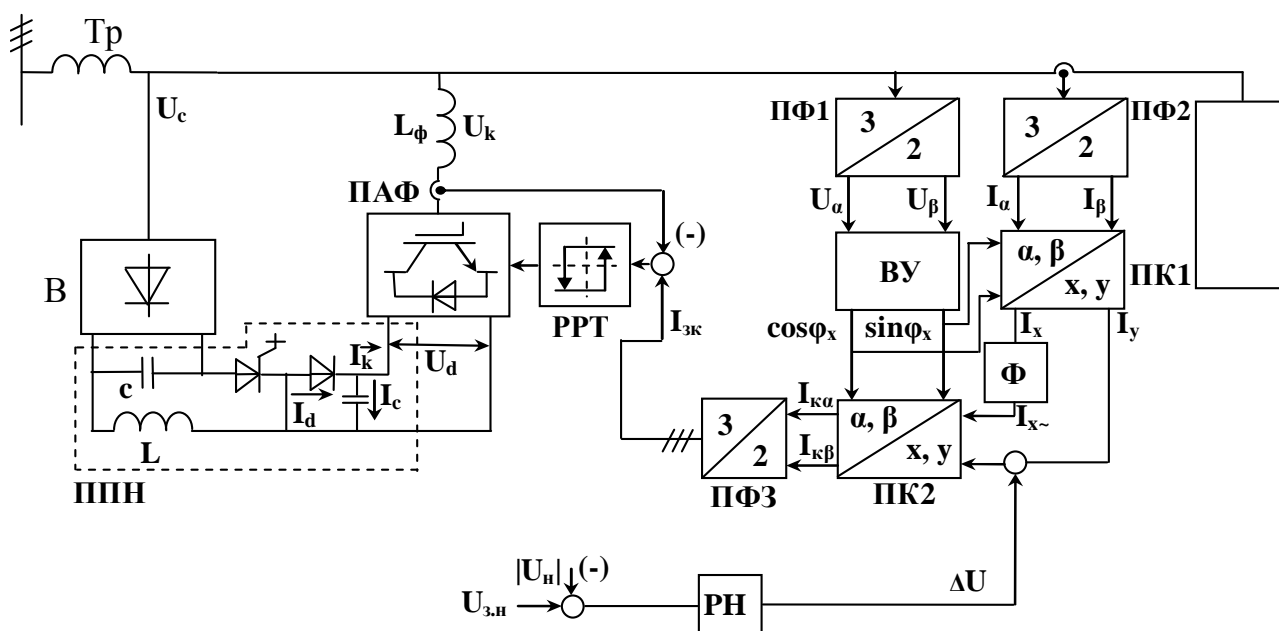


Рис.2. Функциональная схема управления параллельным активным фильтром (ПАФ) при наличии повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное (ППН)

В неподвижной системе координат уравнение электрического равновесия вентильного компенсатора в обозначениях рис.1 имеет вид:

$$\bar{U}_K - \bar{U}_C = \bar{I}_K R_\phi + L_\phi \frac{d\bar{I}_K}{dt}. \quad (5)$$

Переходя к синхронно вращающейся системе координат с использованием зависимости

$$\bar{U}_{K(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{K(x,y)} e^{-j\varphi_x}, \quad (6)$$

получим из (5)

$$\bar{U}_K e^{j\varphi_x} - \bar{U}_C e^{j\varphi_x} = R_\phi \bar{I}_K e^{j\varphi_x} + L_\phi \frac{d(\bar{I}_K e^{j\varphi_x})}{dt}, \quad (7)$$

где  $\varphi_x$  - угол между координатными осями неподвижной и вращающейся систем координат.

Дифференцируя (7), получим после преобразования для ортогональных составляющих напряжения и тока:

$$U_{Kx} - U_{Cx} = R_\phi I_{Kx} + L_\phi \frac{dI_{Kx}}{dt} - \omega_1 L_\phi I_{Ky}; \quad (8)$$

$$U_{Ky} - U_{Cy} = R_\phi I_{Ky} + L_\phi \frac{dI_{Ky}}{dt} + \omega_1 L_\phi I_{Kx}. \quad (9)$$

Дополнительные преимущества при представлении вентильного компенсатора, как объекта управления и синтеза регуляторов САУ качеством электроэнергии, получаются в синхронно вращающейся системе координат  $x, y$ , ориентированной по результирующему вектору напряжения сети. При этом в (9) исчезает составляющая  $U_{Cy}$ .

Баланс активных мощностей на входе и выходе вентильного компенсатора в синхронно вращающейся системе координат

$$\frac{3}{2} U_c I_{Kx} + \Delta P = U_d I_k. \quad (10)$$

Откуда, пренебрегая суммарными потерями  $\Delta P$  вентильного компенсатора, имеем

$$I_k = \frac{3}{2} U_c I_{Kx} / U_d. \quad (11)$$

Соотношения между  $I_c$  и  $I_k$  и напряжением  $U_d$  связаны зависимостями:

$$I_d = I_c + I_k; \quad I_c = c \frac{dU_c}{dt}. \quad (12)$$

Соответствующая приведенным уравнениям структурная схема непре-

ривной модели ПАФ представлена на рис.3.

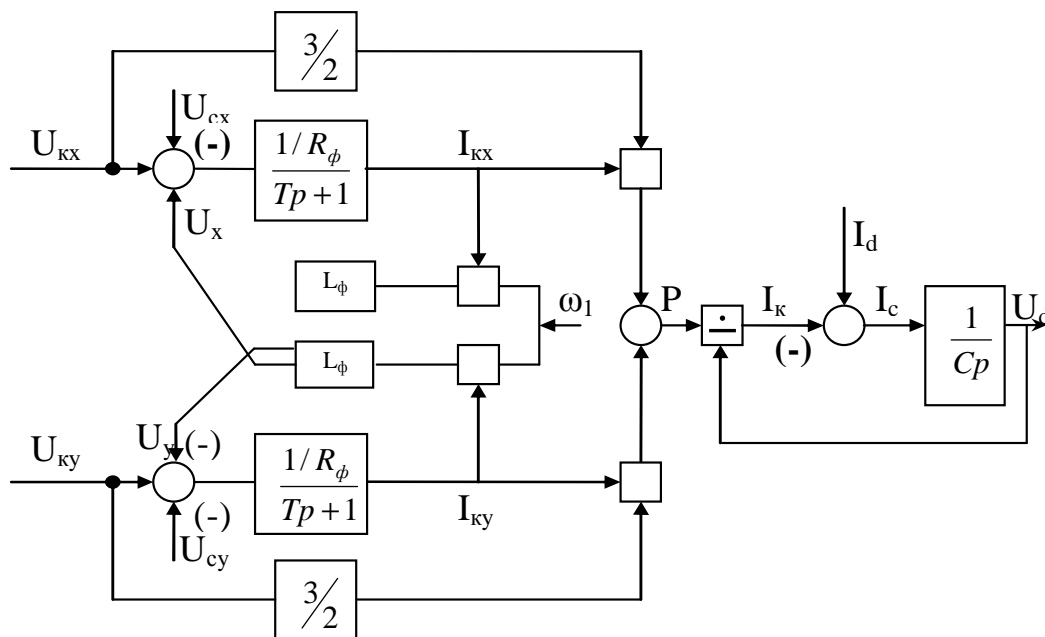


Рис.3. Структурная схема непрерывной модели ПАФ

Управление режимами ПАФ может применяться для нескольких различных целей:

1. Компенсация реактивной мощности сдвига первой гармоники, пропорциональной постоянной составляющей  $I_y$  результирующего вектора тока нагрузки.

2. Минимизация (подавление) высших гармоник, для чего в схеме рис.2 в качестве управляющих воздействий следует использовать сумму переменных составляющих компонент  $I_x$ ,  $I_y$  вектора тока нагрузки. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

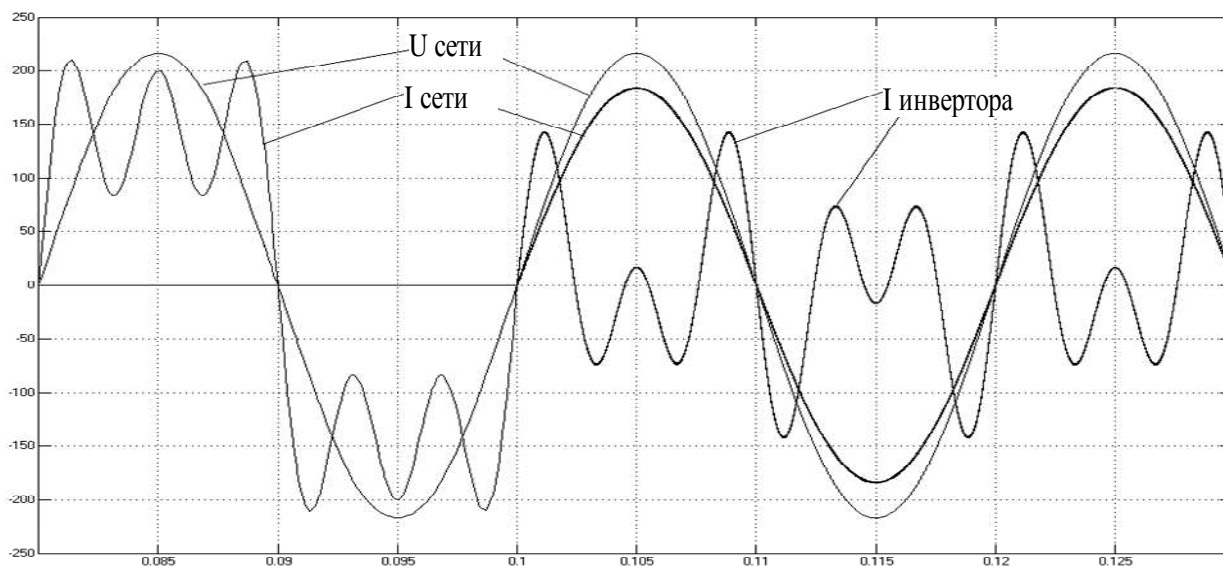


Рис.4. Графики напряжения и тока сети и инвертора вентиляционного компенсатора в режиме подавления высших гармоник

3. Компенсация неактивных составляющих полной мощности, пропорциональной сумме компоненты  $I_y$  и переменной составляющей  $I_x$  (рис.2).

4. Стабилизация напряжения на нагрузке путем варьирования коэффициента мощности относительно заданного оптимального значения в сторону опережения при уменьшении напряжения и наоборот. Для чего в схеме рис.2 предусмотрен регулятор напряжения, выходной сигнал которого  $\Delta U$  корректирует реактивную составляющую тока в функции отклонения направления напряжения от заданного значения.

В заключение следует подчеркнуть, что применение на входе ПАФ повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное значительно расширяет его функциональные возможности. При этом помимо компенсации неактивных составляющих мощности можно дополнительно скомпенсировать кратковременные провалы напряжения в режиме коротких замыканий и устранить асимметрию нагрузки, перераспределяя с помощью ПАФ нагрузку между неравномерно загруженными фазами.

#### **Выводы.**

1. Использование повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное в системах управления качеством электроэнергии на основе ПАФ позволяет существенно увеличить генерируемую реактивную мощность, а также компенсировать кратковременные провалы напряжения в режиме коротких замыканий и симметрировать нагрузку.

2. Применение синхронно вращающейся системы координат, ориентированной по результирующему вектору напряжения сети, позволяет на базе  $I_x$ ,  $I_y$  теории мгновенной мощности наиболее просто выделить и непрерывно контролировать неактивные составляющие токов в нелинейных системах с целью управления вентильными компенсаторами на основе АИН с ШИМ.

3. Релейные регуляторы тока в САУ качеством электроэнергии позволяют с высоким быстродействием и точностью компенсировать неактивные составляющие полной мощности в режиме резкопеременных реактивных нагрузок, включая мощные тиристорные приводы постоянного тока.

#### **Список литературы:**

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963, - 774 с.
2. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем энергии. // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. Кременчуг, - 2003, вып.1. – с. 135 – 139.
3. Колб А.А. Релейно-векторное управление САФ в режиме компенсации мощности искажения. // Науковий вісник НГУ. – 2004, №3. – с. 68 – 74.