

*А.А. Колб, канд. техн. наук*

*(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ АКТИВНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ В СИСТЕМАХ ГРУППОВОГО ПИТАНИЯ ПРИВОДОВ**

**Введение.** Широкое применение мощных полупроводниковых преобразователей для регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока, а также рост установленной мощности нелинейных потребителей (в том числе и однофазных) значительно обострили проблему обеспечения требуемого качества электроэнергии: синусоидальность напряжений и токов; коэффициент мощности; стабильность и симметричность напряжения и др. Традиционно эта проблема решается с помощью конденсаторных батарей и фильтрокомпенсирующих устройств, применение которых, при сложном спектре гармоник тока, является малоэффективным [1].

Одним из направлений энергосбережения средствами промышленного электропривода и повышения их электромагнитной совместимости является применение систем группового питания электроприводов с емкостными накопителями, снабженных силовыми активными компенсаторами (САК) на основе АИН с ШИМ [2], которые уже давно используются в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе. Регулируя величину и фазу входного напряжения АИН методом высокочастотной ШИМ с использованием обобщенных (пространственных) векторов тока и напряжения и теории мгновенной мощности для формирования параметра управления, можно с высокой точностью и быстродействием компенсировать как все неактивные составляющие полной мощности (сдвига, искажения, несимметрии), так и отдельные составляющие [3].

**Целью работы является** анализ влияния напряжения в звене постоянного тока на энергетические характеристики и компенсирующие свойства САК в системах группового питания электроприводов с емкостными накопителями.

**Материалы исследования.** В системах группового питания электроприводов от общих силовых шин постоянного тока накопительные конденсаторы  $C_d$  (рис. 1) позволяют аккумулировать энергию торможения одного или группы двигателей и по цепи постоянного тока (минуя сеть и входной преобразователь) передать ее другим двигателям, работающим в режиме потребления энергии, и тем самым исключить энергообменные процессы между сетью и приводами и, следовательно, дополнительные потери энергии в элементах на входе системы. При этом накопленная энергия в звене постоянного тока повторно используется также для управления качеством электроэнергии с помощью САК, включенного на входе системы.

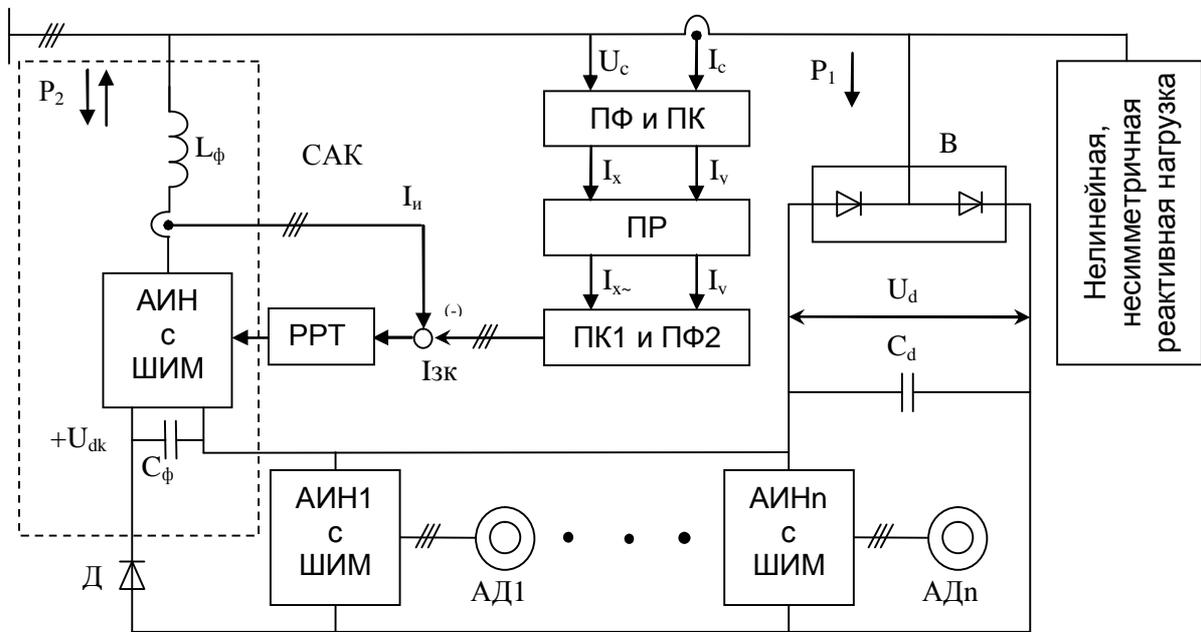


Рис.1. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов с диодным выпрямителем (В) и емкостным накопителем ( $C_d$ )

Регулируя величину и фазу напряжения на входе инвертора, можно обеспечить требуемую величину и направление тока компенсации и тем самым обеспечить заданный оптимальный коэффициент мощности, что повышает эффективность использования и передачи электроэнергии.

С помощью САК решается также актуальная проблема повышения коэффициента мощности за счет улучшения гармонического состава потребляемого тока (фильтрация гармоник) и симметрирования нагрузки [3].

Энергетические свойства и режимы работы САК можно проанализировать с помощью известной расчетной схемы (рис. 2), представленной в обобщенных (результатирующих) векторах напряжения и тока. На рисунке обозначено:  $\bar{U}_c, \bar{U}_u, \bar{I}_k$  – обобщенные векторы напряжений сети и инвертора, тока компенсации, модули которых равны амплитудным значениям;  $X, R$  – индуктивное и активное сопротивления контура компенсации.

Под действием напряжения  $\Delta\bar{U} = \bar{U}_c + \bar{U}_u$  возникает ток компенсации  $\bar{I}_k$  (рис. 2, б), отстающий от  $\Delta\bar{U}$  на  $90^\circ$ . Ортогональная составляющая  $I_{ky}$  этого тока является чисто емкостной по отношению к напряжению сети  $\bar{U}_c$  и тем самым реализуется режим компенсации реактивной мощности сдвига. При этом другая ортогональная составляющая  $I_{kx}$  находится в противофазе с  $\bar{U}_c$ , что свидетельствует о возврате энергии из звена постоянного тока САК в сеть. Таким образом, в рассматриваемом случае реализуется режим компенсации реактивной мощности и возврата энергии в сеть.

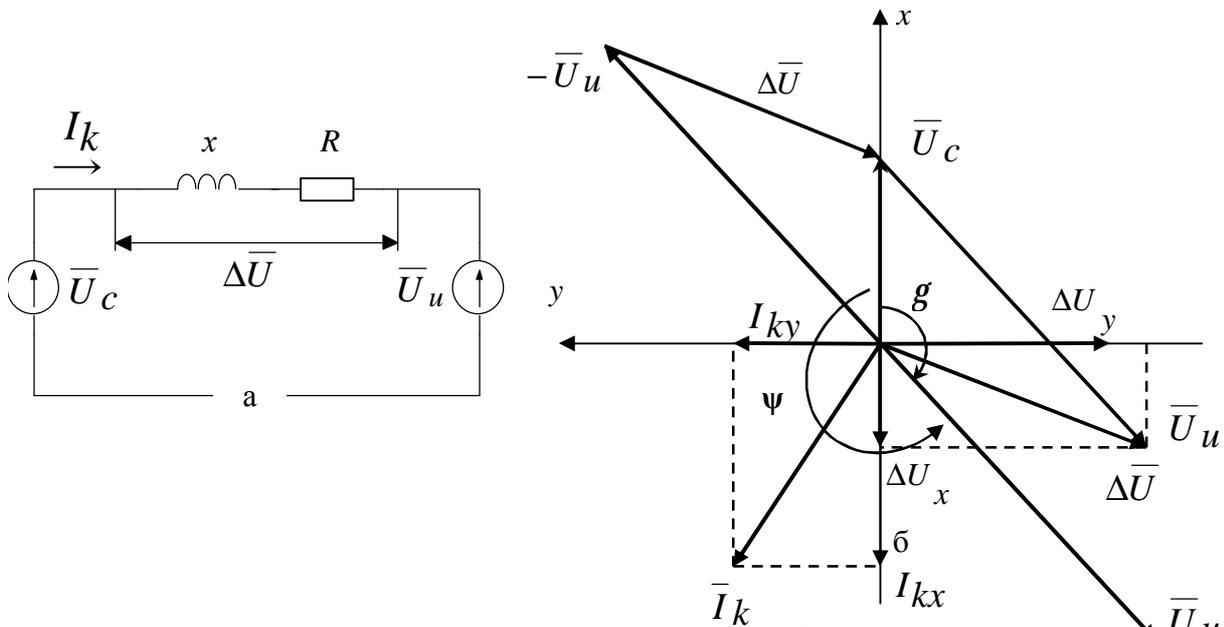


Рис.2. Эквивалентная расчетная схема САК в обобщенных векторах (а) и векторная диаграмма (б) без учета потерь в контуре

В синхронно-вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, активная и реактивная мощности, потребляемые (генерируемая) САК, определяются как [4]:

$$P = \frac{3}{2} U_c I_{kx}; \quad Q = \frac{3}{2} U_c I_{ky}, \quad (1)$$

где  $U_c$  – модуль обобщенного вектора напряжения сети;  $I_{kx}$ ,  $I_{ky}$  – ортогональные составляющие обобщенного вектора тока компенсации  $I_k$ ;  $3/2$  – согласующий коэффициент.

В общем случае основная гармоника (гладкая составляющая) обобщенного (результатирующего) вектора тока компенсации определяется как

$$\bar{I}_k = \frac{\Delta \bar{U}}{Z e^{j j_k}} = \frac{U_c e^{j 0^\circ} + U_u e^{j y}}{Z e^{j j_k}} = \frac{U_c e^{-j j_k} + U_u e^{j(y-j_k)}}{Z} \quad (2)$$

или

$$\bar{I}_k = \frac{1}{Z} [U_c \cos j_k - j U_c \sin j_k + U_u \cos(y-j_k) + j U_u \sin(y-j_k)] = \quad (3)$$

$$= I_{kx} + j I_{ky};$$

$$I_{kx} = \frac{1}{Z} [U_c \cos j_k + U_u \cos(y-j_k)]; \quad (4)$$

$$I_{ky} = \frac{1}{Z} [U_c \sin(y-j_k) - U_c \sin j_k],$$

(5)

где  $I_{kx}, I_{ky}$  – ортогональные составляющие тока компенсации соответственно по оси  $x$  и  $y$  вращающейся системы координат, ориентированной по вектору напряжения сети;  $\bar{U}_c, \bar{U}_u, U_c, U_u, \psi$  – обобщенные вектора напряжения сети и инвертора, их модули и фазовый сдвиг между векторами, отсчитываемый в положительном направлении против часовой стрелки;  $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$  – сопротивление контура компенсации;  $\varphi_k = \arctg X/R$  – фазовый сдвиг между векторами  $\Delta \bar{U} = \bar{U}_c + \bar{U}_u$  и  $\bar{I}_k$ .

С учетом выражений (4) и (5) получим из выражения (1) получим:

$$P = \frac{3}{2} U_c \frac{U_c \cos j_k + U_u \cos(\psi - j_k)}{Z}; \quad (6)$$

$$Q = \frac{3}{2} U_c \frac{U_u \sin(\psi - j_k) - U_c \sin j_k}{Z}. \quad (7)$$

Пренебрегая потерями в контуре компенсации ( $R=0; j_k = 90^\circ$ ), что не вносит большой погрешности, и уравнений (6) и (7) запишем:

$$P = \frac{3}{2} U_c \frac{U_u \cos(\psi - p/2)}{X}; \quad (8)$$

$$Q = \frac{3}{2} U_c \frac{U_u \sin(\psi - p/2) - U_c}{X}. \quad (9)$$

Анализ полученных выражений показывает:

**1.** Компенсация реактивной мощности сдвига с помощью САК возможна лишь тогда, когда абсолютное значение проекции обобщенного вектора напряжения инвертора (компенсатора) на ось  $X$  вращающейся системы координат  $X, Y$ , ориентированной по вектору напряжения, больше  $\text{mod } \bar{U}_c$ , а фазовый сдвиг  $\psi$  между векторами  $j_k < \psi < (p + j_k)$ . Причем, если  $j_k < \psi < (\frac{p}{2} + j_k)$  имеет также место потребление активной мощности из сети, а при  $(\frac{p}{2} + j_k) < \psi < (p + j_k)$  – активная мощность из звена постоянного тока возвращается в сеть. Первый случай используется для компенсации потерь в компенсаторе, а второй – для возврата в сеть избыточной энергии рекуперативного торможения группы приводов (векторные диаграммы, рис. 3, а и б соответственно).

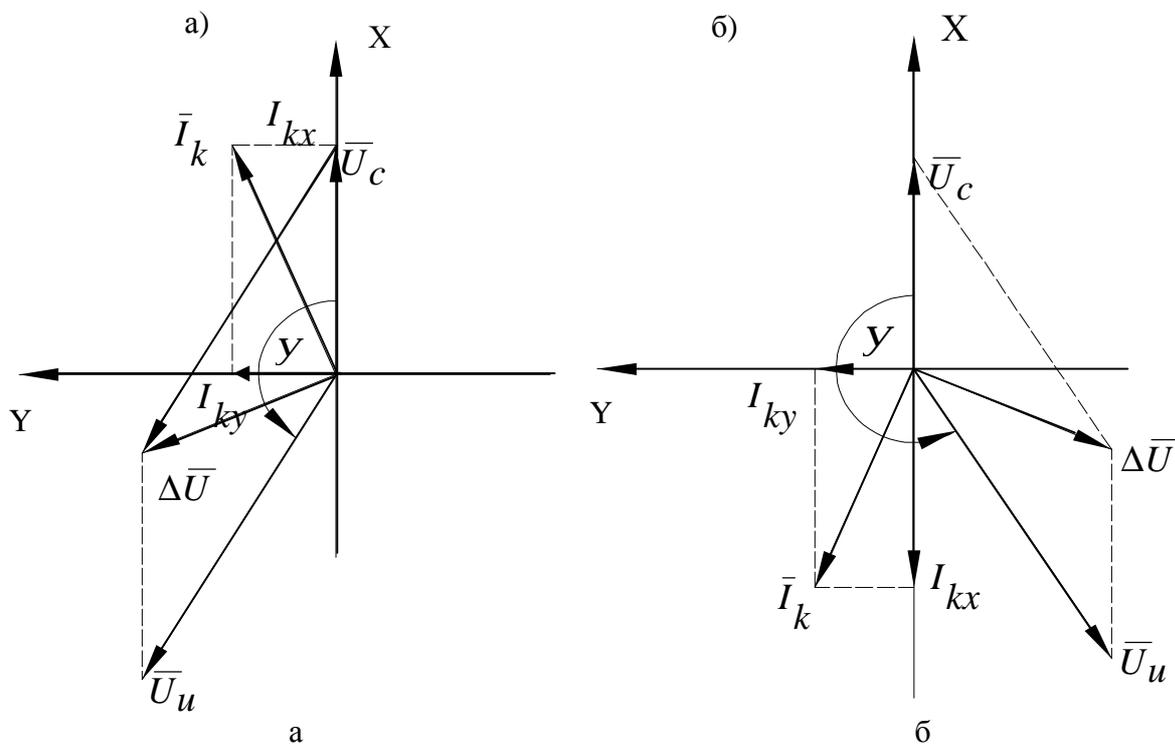


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений и токов в случае  $|\bar{U}_u| > |\bar{U}_c|$ :

а – компенсация реактивной мощности и потребление активной;

б – компенсация реактивной мощности и возврат в сеть активной.

2. Максимально возможная реактивная мощность емкостного характера по отношению к напряжению сети генерируется САК в случае, когда модуль вектора напряжения сети  $\text{mod } \bar{U}_u > \text{mod } \bar{U}_c$ , а фазовый сдвиг между ними без учета потерь  $\psi = \pi$ .

3. Если модули обобщенных векторов напряжений сети и инвертора равны, то при любом фазовом сдвиге между ними нельзя реализовать режим компенсации реактивной мощности сдвига (реактивная составляющая тока компенсации  $I_{ky}$  (рис. 4) отстает от  $\bar{U}_c$ ). При этом, если фазовый сдвиг  $y$  между векторами меньше  $p$  ( $y < p$ ), то из сети потребляется как активная (составляющая  $I_{kx}$ , рис. 4, а совпадает с  $\bar{U}_c$ ), так и реактивная мощность; в случае если  $p < y < 2p$ , то из сети потребляется реактивная мощность, а активная мощность из звена постоянного тока возвращается в сеть (составляющая  $I_{kx}$  рис. 4, б, находится в противофазе с  $\bar{U}_c$ ).

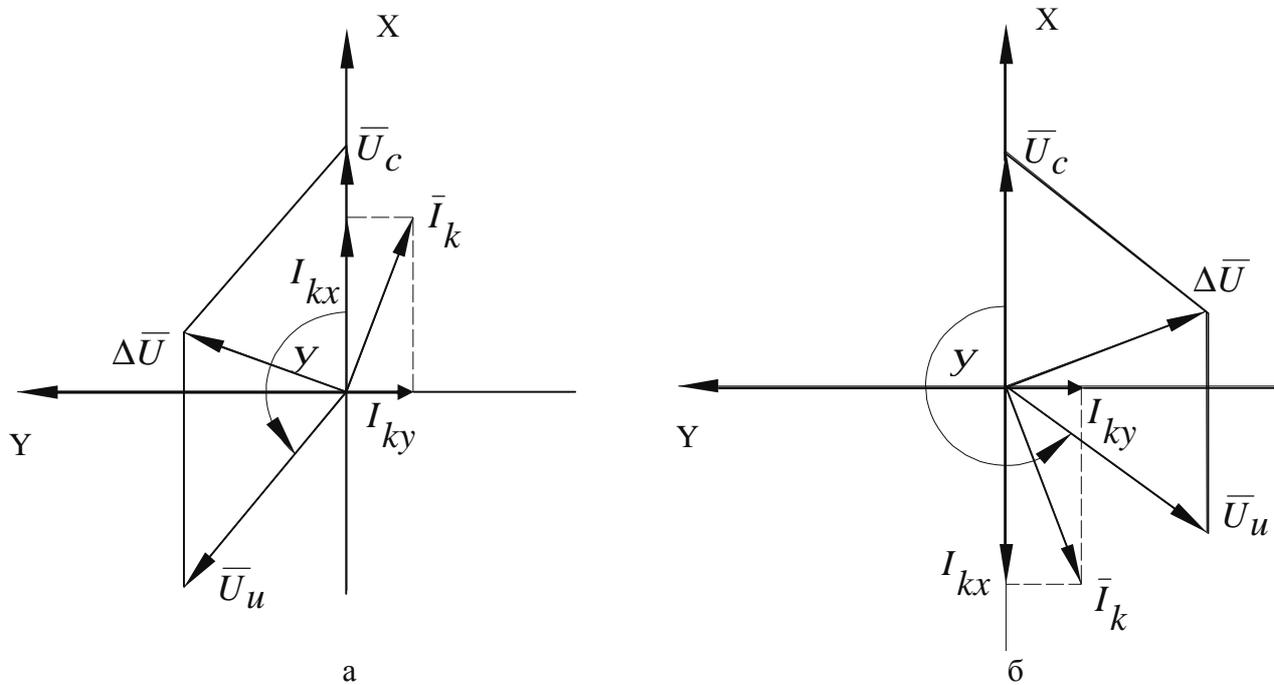


Рис. 4. Векторные диаграммы напряжений и токов при  $|\bar{U}_c| = |\bar{U}_u|$

Таким образом, для реализации режима компенсации реактивной мощности с помощью САК необходимо, чтобы напряжение на входе инвертора (основная гармоника) было больше амплитудного значения линейного напряжения сети. Зная максимальную реактивную мощность, подлежащую компенсации, можно с помощью (9) определить требуемое напряжение на входе инвертора:

$$U_u = \frac{1,5U_c^2 + Q_{\max} X}{1,5U_c \sin(\gamma - p/2)}. \quad (10)$$

Амплитуда основной гармоники фазного напряжения трехфазного АИН с синусоидальной ШИМ при соединении нагрузки в звезду определяется как [5]

$$U_{u.\max} = \mu U_d / 2, \quad (11)$$

где  $\mu$  – коэффициент (глубина) модуляции;  $U_d$  – напряжение в звене постоянного тока.

Поскольку модули обобщенных векторов равны амплитудным значениям соответствующих фазных величин, то согласно (10) и (11) можно определить требуемое значение напряжения  $U_d$  в функции реактивной мощности, подлежащей компенсации с помощью САК:

$$U_d = \frac{2(1,5U_{\phi.\max}^2 + Q_{\max} X)}{1,5mU_{\phi.\max} \sin(\gamma - \rho / 2)}. \quad (12)$$

**Выводы.** Высокое быстродействие САК, его функциональные возможности и точность компенсации неактивных составляющих полной мощности при любых значениях коэффициента мощности (отстающего и опережающего) и практически синусоидальном токе сети могут быть достигнуты лишь в случае, когда напряжение в звене постоянного тока значительно больше амплитудного значения линейного напряжения сети.

#### Список литературы

1. Жежеленко В. И. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий – 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат, 2000.– 331 с.
2. Воробьев А. А., Колб А. А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения// Вестн. Харьк. политех. ун–та: Проблемы автоматизированного электропривода.– 2003.– № 10.- С. 224-228.
3. Колб А. А. Силовые активные компенсаторы в системах группового питания электроприводов// Вісн. Кремен. держ. політехн. ун–ту. – 2007.–Вип. 3(44).– Ч. 2.– С. 44-48.
4. Ковач К. П. Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем.– М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.– 774 с.
5. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А.Я. Бернштейн, Ю. М. Гусяцкий, А. В. Кудрявцев, Р. С. Сарбатов; Под. Ред. Р. С. Сарбатова. – М.: Энергия, 1980. –328с.