

*А.А. Колб, канд. техн. наук*

*(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

## **ВЛИЯНИЕ РЕЗЕРВА НАПРЯЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ АКТИВНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ**

**Введение.** Электроприводы потребляют значительную часть вырабатываемой электроэнергии. Поэтому важное значение приобретают вопросы комплексного подхода к разработке и практическому применению способов энергосбережения и гибкого управления традиционными показателями качества электроэнергии средствами промышленного электропривода.

Системы группового питания электроприводов с емкостными накопителями, снабженные параллельными силовыми активными компенсаторами (ПСАК), позволяют аккумулировать энергию рекуперативного торможения одного или группы двигателей и повторно использовать ее для питания приводов двигательного режима, а также эффективно управлять качеством электроэнергии в нелинейных и несимметричных системах с резкопеременной реактивной нагрузкой [1, 2].

Релейное управление ПСАК для нормализации традиционных показателей качества электроэнергии позволяет реализовать предельно допустимое быстродействие системы и высокую точность регулирования, что достигается форсированным воздействием на объект управления. Для этого система должна обладать требуемым энергетическим ресурсом – статическим и динамическим резервом (запасом) напряжения в звене постоянного тока, инвертированием которого формируется переменное напряжение требуемого значения на силовых входах АИН.

Ширина петли релейных регуляторов тока (РРТ) выбирается как компромиссное решение между амплитудой пульсаций тока и частотой переключения ключей инвертора, непосредственно характеризующей потери мощности.

**Целью работы** является анализ влияния статического и динамического резерва напряжения на входе инвертора на физическую реализуемость режимов компенсации неактивных составляющих тока с заданными быстродействием, амплитудой пульсаций и частотой переключения ключей инвертора.

**Материалы и результаты исследования.** В работе [2] приведена система группового питания приводов с диодным выпрямителем и емкостным накопителем, снабженная одним или несколькими ПСАК, что позволяет не только компенсировать неактивные составляющие тока и поддерживать оптимальный коэффициент мощности на выходе трансформатора, но и минимизировать потери в линии путем подключения компенсаторов в узлах с максимальной реактивной нагрузкой. Если ставится задача поддержания только оптимального режима на выходе трансформатора (без компенсации потерь в линии), то приведенная в работе [2] система группового питания приводов с емкостными накопителями приобретает вид, представленный на рис. 1, где диодный выпрямитель и АИН, включенный по обращенной схеме, соединены параллельно через дрос-

сель  $L$ , образуя комбинированный активный выпрямитель. Выделение и непосредственный контроль мгновенных значений неактивных составляющих полной мощности в приведенной системе реализуются на основе метода  $I_x, I_y$  теории мгновенной мощности с использованием обобщенных (результатирующих) векторов тока и напряжения в синхронно вращающейся системе координат, ось  $x$  которой ориентирована по вектору напряжения сети. Для этого в схеме (рис.1) используются преобразователи фаз и координат, реализованные на основании известных соотношений [3]. С помощью фильтра  $\Phi$  высоких частот из ортогональной составляющей  $I_x$ , пропорциональной активной мощности, выделяется ее переменная составляющая  $I_{x\sim}$ , возникающая лишь в нелинейных и несимметричных системах.

Модулируя методом высокочастотной ШИМ величину и фазу напряжения на входе АИН, можно реализовать практически синусоидальный ток сети с требуемым коэффициентом мощности, близким или равным единице. Если на вход преобразователя координат (рис.1) подаются лишь переменные составляющие  $I_{x\sim}$  и  $I_{y\sim}$  без составляющих двойной частоты, то ПСАК работает в режиме компенсации (фильтрации) высших гармоник [2].

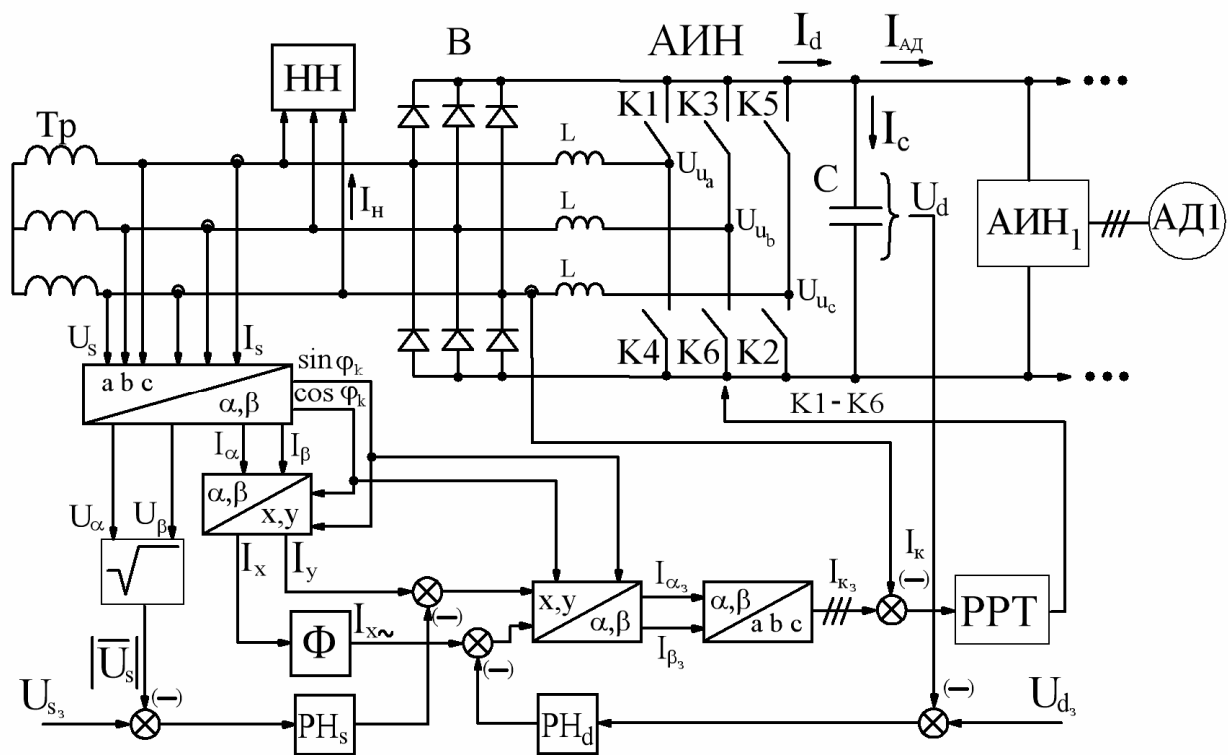


Рис. 1. Функциональная схема комбинированного активного выпрямителя

В режиме симметрирования нагрузки энергия из менее загруженных фаз передается вначале в звено постоянного тока, а затем с помощью ПСАК в более загруженные фазы. Этот режим достигается подачей на вход преобразователя координат ПК (рис.1) только переменных составляющих  $I_x$  и  $I_y$  двойной частоты.

Принцип работы ПСАК на основе диодного выпрямителя и АИН с ШИМ заключается в том, что он генерирует в сеть ток, равный сумме противоположных по фазе токов высших гармоник и реактивного тока нагрузки. В результате

этого ПСАК совместно с нелинейной и несимметричной нагрузкой представляет для сети практически чисто активную нагрузку. В схеме (рис.1) с помощью регулятора напряжения сети (РНs) варьируется характер тока сети (реактивный или емкостной) и тем самым при наличии быстродействующей системы регулирования можно стабилизировать напряжение на нагрузке. При этом в случае снижения напряжения на нагрузке ток сети приобретает емкостной характер и наоборот.

Регулятор напряжения (РНd), воздействуя на активную составляющую тока  $I_x$  поддерживает напряжение в звене постоянного тока на заданном уровне.

Для анализа установившихся и переходных режимов в системе при высокой частоте коммутации ключей инвертора целесообразно использовать эквивалентную модель, полученную в результате непрерывной аппроксимации его дискретной коммутационной функции. При этом в неподвижной системе координат  $a, b$  уравнение напряжений САК описывается в обобщенных векторах известным управлением

$$\bar{U}_{u(a,b)} + \bar{U}_{S(a,b)} = \bar{I}_{k(a,b)} R + L \frac{d\bar{I}_{k(a,b)}}{dt}, \quad (1)$$

где  $\bar{U}_{u(a,b)}$ ,  $\bar{U}_{S(a,b)}$ ,  $\bar{I}_{k(a,b)}$  – обобщенные вектора напряжений инвертора, сети и тока компенсации в неподвижной системе координат  $a, b$ ;  $R$  – суммарное сопротивление контура компенсации, включающее сопротивление фильтра, обмоток трансформатора и потери в ключах;  $L$  – результирующая индуктивность, включающая индуктивности фильтра  $L_\phi$  и рассеяния обмоток трансформатора.

Переход к вращающейся системе координат  $x, y$  дает дополнительные преимущества – упрощает синтез регуляторов, так как при этом гармонические переменные трансформируются в эквивалентные им постоянные ортогональные составляющие. Переход от одной системы координат к другой реализуется на основании известных соотношений

$$\bar{U}_{(a,b)} = \bar{U}_{(x,y)} e^{j\dot{j}_k}; \quad \bar{U}_{(x,y)} = \bar{U}_{(a,b)} e^{-j\dot{j}_k}, \quad (2)$$

где  $\dot{j}_k$  – угол между координатными осями.

На основании выражения (2) из формулы (1) в синхронно вращающейся системе координат (индексы  $x, y$ -опущены) запишем:

$$\bar{U}_u e^{j\dot{j}_k} + \bar{U}_s e^{j\dot{j}_k} = R \bar{I}_k e^{j\dot{j}_k} + L \frac{d(\bar{I}_k e^{j\dot{j}_k})}{dt}, \quad (3)$$

где  $w = d\dot{j}_k / dt$  – угловая скорость координатных осей, равная угловой частоте  $w = 2p f$  питающего напряжения.

Дифференцируя выражение (3) и сокращая на  $e^{j\dot{j}_k}$ , получим уравнение системы в векторной форме в синхронно вращающейся системе координат  $x, y$ :

$$\bar{U}_u + \bar{U}_s = R\bar{I}_k + L\frac{d\bar{I}_k}{dt} + jwL\bar{I}_k. \quad (4)$$

Переходя к ортогональным составляющим, имеем в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, имеем:

$$U_{ux} + U_{sx} = RI_{kx} + L\frac{dI_{kx}}{dt} - wLI_{ky}; \quad (5)$$

$$U_{uy} + U_{sy} = RI_{ky} + L\frac{dI_{ky}}{dt} + wLI_{kx}. \quad (6)$$

В установившемся периодическом режиме (постоянство компенсируемой реактивной мощности) производные токов в (5) и (6) равны нулю и статический резерв напряжения по осям  $x$ , и  $y$  для гладкой составляющей тока определяется как

$$\begin{aligned} \Delta\bar{U}_x &= U_{ux} + U_{sx} = I_{kx}R - w_kLI_{ky}; \\ \Delta\bar{U}_y &= U_{uy} + U_{sy} = I_{ky}R + w_kLI_{kx}. \end{aligned} \quad (7)$$

На основании выражений (7) можно для гладких составляющих тока (непрерывная модель) сформулировать условие физической реализуемости режима компенсации реактивной мощности  $Q$  в виде статического резерва (запаса) напряжения на входе АИН, модуль которого

$$\Delta U_{cm} = \sqrt{(I_{kx}R - wLI_{ky})^2 + (I_{ky}R + wLI_{kx})^2} = I_k Z \approx I_{sy} Z, \quad (8)$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + (wL)^2}$  – полное сопротивление контура компенсации;  $I_{sy}$  – реактивная составляющая тока сети.

Пространственное положение  $\Delta y$  вектора  $\Delta\bar{U}_{cm}$  согласно выражения (7) определяется как

$$\Delta y = \arctg \frac{I_{ky}R + wLI_{kx}}{I_{kx}R - wLI_{ky}}. \quad (9)$$

Как правило,  $I_{kx}R \ll wLI_{ky}$  и поэтому знаменатель в уравнении (9) будет отрицательным и, следовательно, угол  $\Delta y$  находится в пределах  $p/2 < y < p$ , так как  $\sin \Delta y > 0$ , а  $\cos \Delta y < 0$ .

На основании приведенных соотношений на рис. 2 построена векторная диаграмма напряжений и токов САК в режиме компенсации реактивной мощности и потребления активной для восполнения потерь в системе. Из приведенного рисунка следует, что результирующий вектор напряжения инвертора

$\bar{U}_u = \bar{U}_s - \Delta\bar{U}_{cm}$  в этом режиме отстает от  $\bar{U}_s$  на угол  $j_u$ , который определяется как:

$$j_u = \arctg \frac{I_{ky}R + \omega LI_{kx}}{U_s + I_{kx}R - I_{ky}\omega L}. \quad (10)$$

Составляющие токов  $I_{ky}$  и  $I_{kx}$  в уравнении (10) можно выразить через реактивную мощность  $Q$ , подлежащую компенсации. В синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору напряжения сети,  $Q = \frac{3}{2}U_s I_{sy}$  [4]. Откуда без учета потерь в системе

$$I_{sy} = I_{ky} = 2Q/3U_s. \quad (11)$$

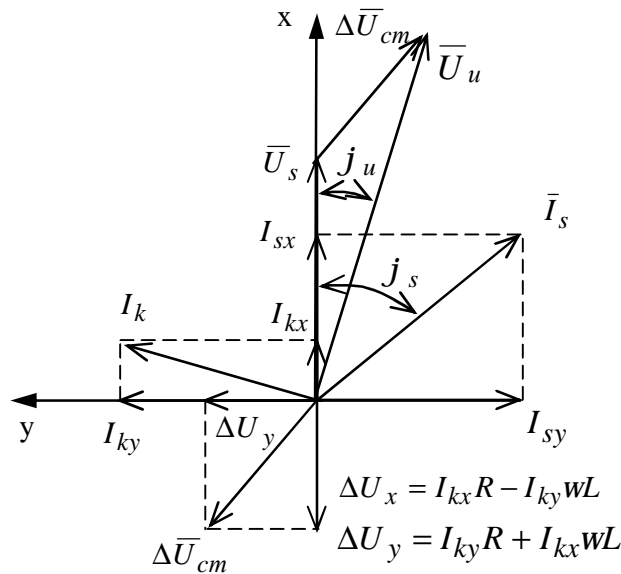


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов в режиме компенсации реактивной мощности и потребления активной

Приравнивая суммарные потери в системе  $\Delta P = \frac{3}{2}I_k^2 R$  и мощность, потребляемую из сети для компенсации этих потерь  $\Delta P_s = \frac{3}{2}U_s I_{kx}$ , получаем:

$$I_{kx} = I_k^2 R / U_s \approx I_{sy}^2 R / U_s \quad (12)$$

Согласно выражений (8)–(12) имеем:

$$\Delta U_{cm} = \frac{2QZ}{3U_s};$$

$$j_u = \arctg \frac{U_s I_{sy} R + \omega L I_{sy}^2 R}{U_s^2 + R^2 I_{sy}^2 - U_s I_{sy} \omega L}.$$
(13)

Динамический резерв напряжения  $\Delta U_d$ , необходимый лишь для реализации требуемой частоты коммутации ключей при заданной амплитуде пульсаций тока, может быть определен на основании анализа кривых изменения тока компенсации  $i_k$  при несимметричном периодическом режиме (рис. 3), описываемых отрезками экспонент.

Для промежутка времени  $0 \leq t \leq T_1$

$$i_{k1} = \frac{U_\Sigma}{R} (1 - e^{-t/T}) - \left( i_3(t) - \frac{\Delta i}{2} \right) e^{-t/T},$$
(14)

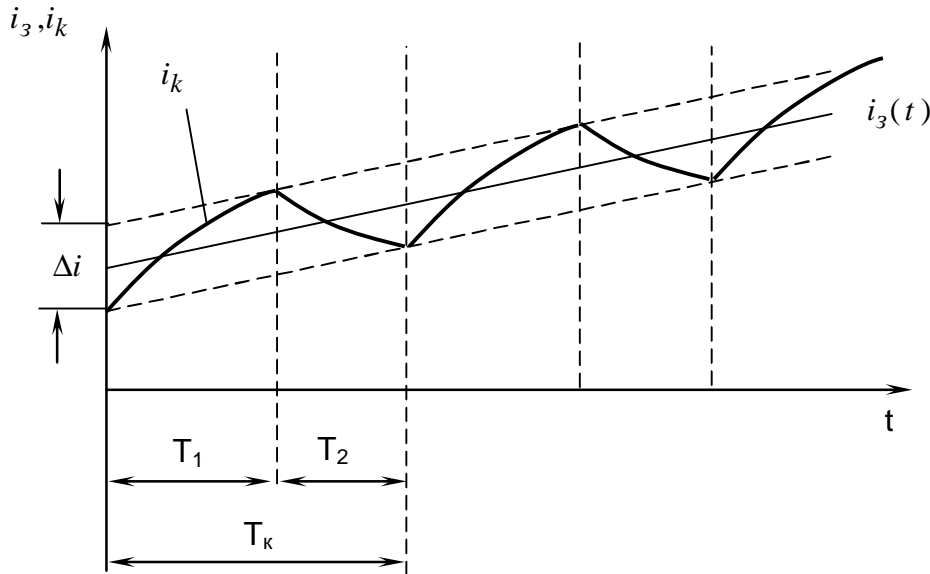


Рис. 3. Графики изменения тока компенсации  $i_k$  в системах с релейным управлением

для промежутка времени  $0 \leq t \leq T_2$

$$i_{k2} = -\frac{U_\Sigma}{R} (1 - e^{-t/T}) + \left( i_3(t) + \frac{\Delta i}{2} \right) e^{-t/T},$$
(15)

где  $T=L/R$  — электромагнитная постоянная времени контура;  $\Delta i$  — ширина петли гистерезиса релейного регулятора тока;  $U_\Sigma$  — модуль вектора результирующего напряжения  $\bar{U}_\Sigma = U_u e^{j\alpha_u} - U_s e^{j\alpha_s}$ .

Полупериод  $T_1$  заканчивается, когда ток компенсации достигает значения  $i_k = i_3 + \Delta i / 2$ , а полупериод  $T_2$  – тогда, когда  $i_k = i_3 - \Delta i / 2$ . С учетом этого выражения для определения полупериодов  $T_1$  и  $T_2$  имеют вид

$$i_3(t) + \Delta i / 2 = \frac{U_\Sigma}{R} (1 - e^{-T_1/T}) - \left( i_3(t) - \frac{\Delta i}{2} \right) e^{-T_1/T} ; \quad (16)$$

$$i_3(t) - \Delta i / 2 = -\frac{U_\Sigma}{R} (1 - e^{-T_2/T}) + \left( i_3(t) + \frac{\Delta i}{2} \right) e^{-T_2/T} . \quad (17)$$

Частота коммутации ключей инвертора САК зависит как от параметров схемы, так и от мгновенного значения тока задания и его производной. Аналитическое определение периода коммутации в этом случае сопряжено с большими трудностями и может быть исследовано численными методами. В случае если  $i_3(t) = I_3 = const$ , то согласно выражений (16) и (17) уравнение периода коммутации  $T_k$  имеет вид:

$$T_k = T_1 + T_2 = T \ln \frac{I_m + \Delta i - I_3^2 / I_m}{I_m - \Delta i - I_3^2 / I_m} = T \ln \left( 1 + \frac{\Delta i}{I_m} - \frac{I_3^2}{I_m^2} \right) / \left( 1 - \frac{\Delta i}{I_m} - \frac{I_3^2}{I_m^2} \right) \quad (18)$$

или

$$T_k = T \ln \left( \frac{I_m}{I_3} + \frac{\Delta i}{I_3} - \frac{I_3}{I_m} \right) / \left( \frac{I_m}{I_3} - \frac{\Delta i}{I_3} - \frac{I_3}{I_m} \right), \quad (19)$$

где  $I_m = U_\Sigma / R$  – установившееся значение тока.

Графики функций  $T_k / T = f(I_m / I_{3,m})$  для различных значений коэффициента пульсаций тока  $K_i = \Delta i / I_{3,m}$ , построенные по уравнению (19) приведены на рис 4.

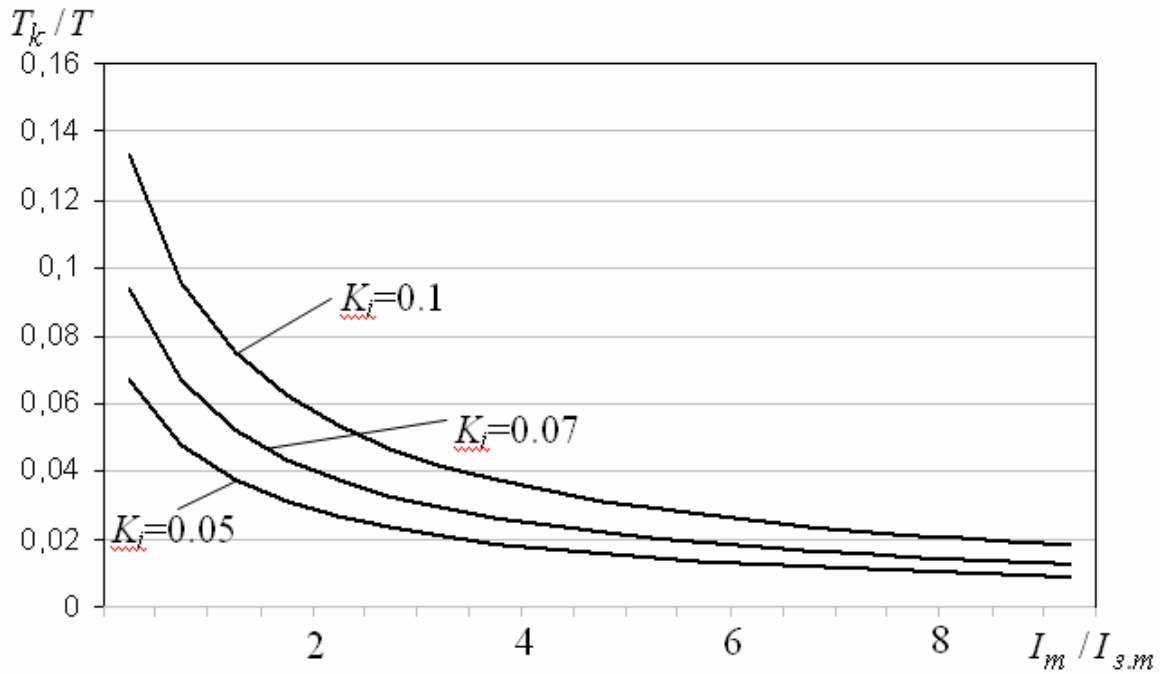


Рис. 4. Зависимость  $T_k / T = f(I_m / I_{3.m})$  для различных значений коэффициента пульсаций тока  $K_i$  САК

При синусоидальном токе задания  $i_3 = I_{3.m} \sin \omega t$ , что имеет место в системах, управляемых по мгновенным значениям неактивных составляющих полной мощности, период коммутации без большой погрешности определяется выражением

$$T_k = T \ln \frac{\frac{I_m}{I_{3.m}} + \frac{\Delta i}{I_{3.m}} - \frac{I_{3.m} \sin^2 \gamma}{I_m}}{\frac{I_m}{I_{3.m}} - \frac{\Delta i}{I_{3.m}} - \frac{I_{3.m} \sin^2 \gamma}{I_m}}, \quad (20)$$

где  $\gamma$  – начальная фаза тока задания.

Ограничиваясь в уравнении (18) двумя членами ряда, получим приближенное выражение периода коммутации ключей инвертора при  $I_3 = const$

$$T_k = \frac{2T\Delta i}{I_m} \left( 1 + \frac{I_3^2}{I_m^2} \right) = \frac{2TK_i I_3}{I_m} \left( 1 + \frac{I_3^2}{I_m^2} \right), \quad (21)$$

для синусоидального тока задания

$$T_k = \frac{2TK_i I_{3.max}}{I_m} \left( 1 + \frac{I_{3.m}^2 \sin^2 \gamma}{I_m^2} \right). \quad (22)$$



Приведенное выражение (18) позволяет определить минимальный коэффициент пульсаций тока инвертора  $K_i = \Delta i / I_{3.m}$ , а, следовательно, и максимальную ширину зоны гистерезиса  $\Delta i_{\max}$  релейного регулятора тока с учетом допустимой частоты коммутации ключей инвертора при заданных параметрах контура компенсации.

$$K_i = \frac{T_k}{2T \frac{I_{3.m}}{I_m} \left(1 + \frac{I_{3.m}^2}{I_m^2}\right)}; \Delta i = \frac{T_k I_m}{2T \left(1 + \frac{I_{3.m}^2}{I_m^2}\right)}. \quad (23)$$

Преобразованное выражение (21)

$$U_{\Sigma}^2 (T_k U_{\Sigma} - 2LK_i I_{3.m}) = 2LK_i I_{3.m}^3 R^2 \quad (24)$$

показывает, что минимальный динамический запас напряжения на входе АИН, обеспечивающий воспроизведение тока задания с требуемой амплитудой пульсаций (быстродействие в "малом"), составляет

$$\Delta U_{\partial, \min} > \frac{2LK_i I_{3.m}}{T_k} = \frac{2L\Delta i}{T_k}, \quad (25)$$

т.е. при заданной индуктивности контура  $\Delta U_{\partial, \min}$  пропорционально ширине петли гистерезиса РРТ и частоте коммутации  $f_k = 1/T_k$  ключей инвертора.

Динамический резерв напряжения, необходимый для реализации требуемого времени первого согласования  $t_p$  в замкнутой системе при набросе реактивной мощности, определяется вторыми составляющими правых частей уравнений (5) и (6). С учетом заданного времени первого согласования эти составляющие в осях  $x, y$  определяются как:

$$\Delta U'_{\partial x} = L \frac{dI_{kx}}{dt} = \frac{LI_{kx}}{t_p} = \frac{RLI_{sy}^2}{U_s t_p}; \quad (26)$$

$$\Delta U'_{\partial y} = L \frac{dI_{ky}}{dt} = \frac{LI_{ky}}{t_p} = \frac{LI_{sy}}{t_p}. \quad (27)$$

На основании этих выражений модуль динамического резерва напряжения на входе инвертора, необходимого для реализации заданного быстродействия в "большом":

$$\Delta U'_{\partial} = \sqrt{\Delta U'_{\partial x}{}^2 + \Delta U'_{\partial y}{}^2} = \frac{LI_{sy}}{t_p} \sqrt{1 + \frac{RI_{sy}}{U_s}} = \frac{2LQ}{3U_s t_p} \sqrt{1 + \frac{RI_{sy}}{U_s}}. \quad (28)$$

Суммарный резерв напряжения  $U_{\Sigma}$  определяется геометрической суммой напряжений, найденных по (8),(25) и (28), составляет

$$\bar{U}_{\Sigma} = U_{\Sigma}x + jU_{\Sigma}y = \left( I_{kx}R - wLI_{sy} - \frac{2L\Delta i}{T_k} + \frac{LI_{kx}}{t_p} \right) + j \left( I_{ky}R + wLI_{kx} + \frac{2L\Delta i}{T_k} + \frac{LI_{sy}}{t_p} \right) \quad (29)$$

Используя соотношения (11) и (12) составляющие  $I_{sy}$  и  $I_{kx}$  в выражении (29) можно заменить соответствующей им реактивной мощностью, подлежащей компенсации.

Для синтеза системы замкнутый контур тока с релейными регуляторами может быть представлен апериодическим звеном

$$W_{T(p)} = \frac{I_k(p)}{I_3(p)} = \frac{1}{T_3 p + 1} \quad (30)$$

с эквивалентной постоянной времени  $T_3 = T\Delta U_{cm} / \Delta U'_{\delta} + \Delta U_{cm}$ , (где  $U_{cm}$  и  $\Delta U'_{\delta}$  определяются по (8) и (28)), полученной из анализа изменения тока в цепи  $R, L$  при наличии и отсутствии динамического резерва напряжения.

**Выводы.** Полученные выражения позволяют определить статический и динамический резервы напряжения в звене постоянного тока для физической реализуемости процесса компенсации реактивной мощности с заданным быстродействием, уровнем пульсаций тока и частотой коммутации ключей инвертора.

Динамический резерв напряжения, найденный по полученным выражениям, обеспечивает инвариантность замкнутой системы автоматического регулирования качества электроэнергии с релейным управлением к параметрическим и внешним возмущениям.

### Список литературы

1. Колб А.А. Силовые активные компенсаторы в системах группового питания электроприводов // Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2007. – Вип. 3/2007 (44), ч. 2. – С. 44–48.
2. Колб А.А. Компенсация реактивной мощности в электроприводах с емкостными накопителями // Зб. наук. праць міжнар. наук.-техн. конф. "Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств". – Маріуполь. – 2008. – С. 232–235.
3. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования активного фильтра // Электротехника. -2002.-№12.-С.12–16.
4. Колб А.А. К расчету напряжения в звене постоянного тока силовых активных компенсаторов в системах группового питания приводов // Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 4/2008 (51), ч. 1. – С.37–41.