

*Ант.А. Колб, канд. техн. наук, А.А. Колб, канд. техн. наук
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

К РАСЧЕТУ НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В СИСТЕМАХ ГРУППОВОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Введение. Необходимость энергосбережения в условиях мирового энергетического кризиса резко возросла. Так как электроприводы потребляют около 70% вырабатываемой в стране электроэнергии (далеко не всегда рационально), то проблема энергосбережения и повышения качества электроэнергии в системах промышленного электропривода, где имеются огромные резервы, является актуальной и востребованной практикой.

Радикальным решением проблемы энергосбережения является применение группового питания регулируемых электроприводов на основе АИН с ШИМ от общих питающих шин постоянного тока с использованием емкостных накопителей энергии (рис. 1). Такая система электропривода обладает рядом существенных преимуществ [1–3]: гибкая конфигурация и унификация силовых блоков и модулей управления; исключается двухсторонняя циркуляция энергии между сетью и двигателями, так как энергия рекуперативного торможения одного или группы двигателей передается (минуя сеть) посредством емкостного накопителя на другие электроприводы двигательного режима работы; снижаются динамические нагрузки, воспринимаемые емкостным накопителем, а следовательно, и потери энергии в элементах силовой цепи, что снижает их установленную мощность. Существенно, что запасенная энергия емкостным накопителем может быть эффективно использована для нормализации основных показателей качества электроэнергии с помощью параллельных активных фильтров (ПАФ) с системой релейно-векторного управления [4,5]. Результаты компьютерного моделирования фильтрации 5-й и 7-й гармоник, а также реактивной мощности и мощности искажения указанных гармоник приведены на рис. 2 и 3, где обозначено: U_c , I_c , I_i – соответственно напряжение, ток сети и ток инвертора ПАФ.

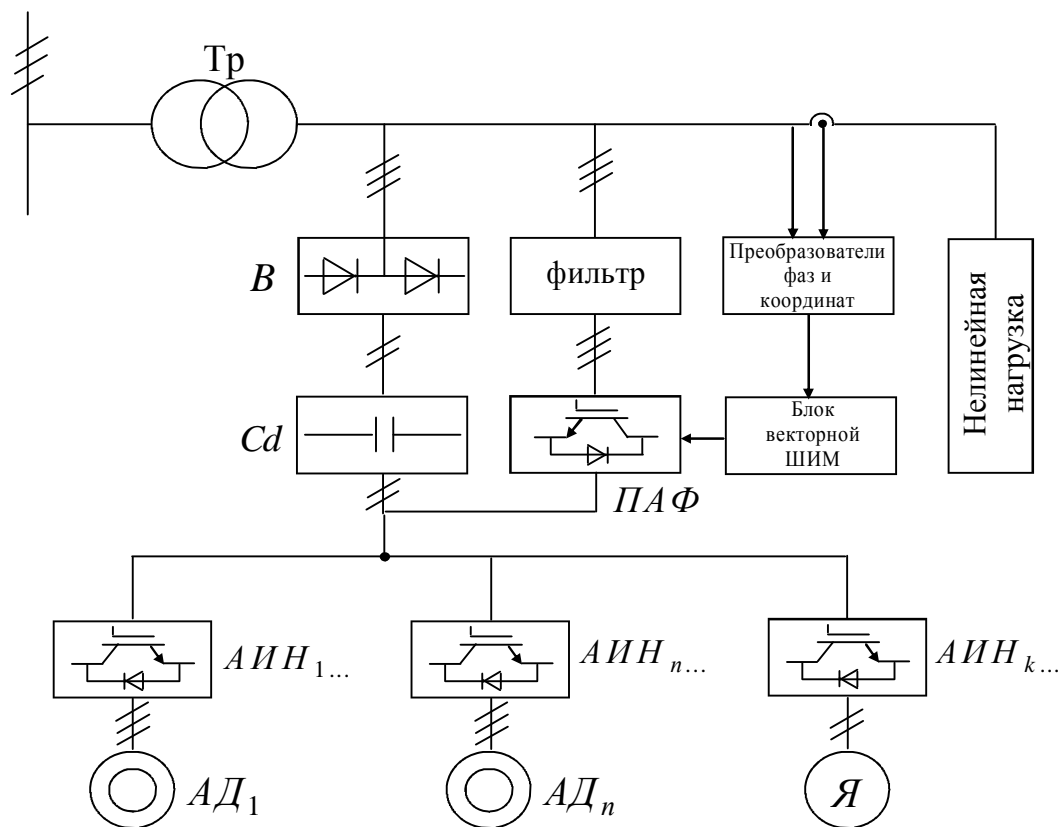


Рис.1. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов

Цель работы – обоснование выбора емкости конденсаторных накопителей электроэнергии в системах группового питания электроприводов от общих питающих шин постоянного тока.

Результаты исследования. В системах группового питания электроприводов накопительные конденсаторы в звене постоянного тока, включенные на выходе выпрямителя (рис.1), служат для обмена энергией между электроприводами, работающими в различных режимах, а также для аккумуляции энергии рекуперативного торможения группы приводов и электромагнитной энергии, запасенной в обмотках машин. Последний случай имеет место как при очередной коммутации ключей инвертора, так и в аварийных режимах, когда закрываются все ключи инвертора и накопленная энергия в обмотках двигателя, разряжаясь через обратные диоды и конденсатор, увеличивает его напряжение.

В системах индивидуального электропривода с питающими шинами переменного тока, силовые блоки которых содержат выпрямитель и инвертор, допускается увеличение напряжения в звене постоянного тока на 15% от максимально выпрямленного напряжения $U_{a0} = 2,34U_{\phi}$ [6].

В системах группового питания электроприводов от общих шин постоянного тока и наличии параллельного активного фильтра, предназначенного для управления качеством электроэнергии, напряжение на конденсаторе может неконтролируемо увеличиваться при избыточной энергии рекуперативного торможения группы приводов лишь в течение времени запаздывания T_m АИН, ко-

торое обычно принимается равным 0,001–0,002с [6, 7].

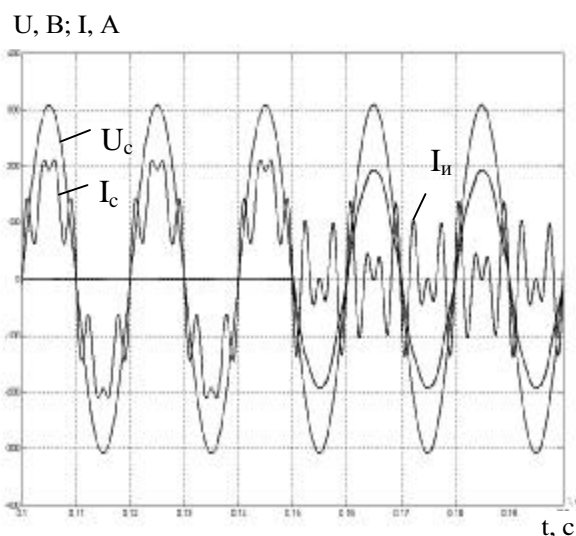


Рис. 2. Графики напряжения и токов в режиме фильтрации 5-й и 7-й гармоник

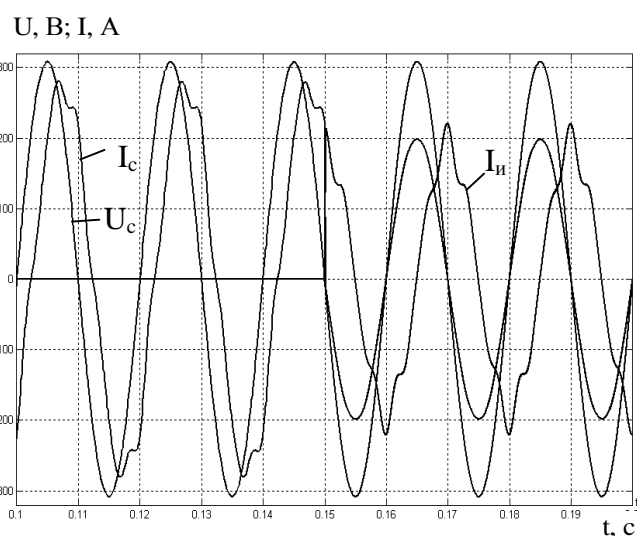


Рис. 3. Режим компенсации реактивной мощности и искажения 5-й и 7-й гармоник

Более жесткие требования следует предъявлять к допустимому снижению напряжения в звене постоянного тока. Это обусловлено снижением статических и динамических показателей электропривода, а в ряде случаев нарушением технологического процесса, например, вследствие уменьшения требуемой угловой скорости двигателя при номинальном потоке.

Рассмотрим требуемое значение емкости накопительного конденсатора для аккумуляции избыточной энергии рекуперативного торможения. Если в процессе работы электропривода угловая скорость изменяется от w_1 до w_2 , то отдаваемая кинетическая энергия составляет

$$\Delta W = J(w_1^2 - w_2^2) / 2, \quad (1)$$

где J – суммарный приведенный момент инерции привода.

По отношению к исходному запасу кинетической энергии это составляет

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{w_1^2 - w_2^2}{w_1^2} = w^* (2 - w^*), \quad (2)$$

где $w^* = \frac{w_1 - w_2}{w_1}$ – относительное снижение угловой скорости.

Из приведенного выражения видно, что процесс отдачи накопленной кинетической энергии происходит непропорционально скорости и в конце процесса торможения отдача незначительная.

При линейном законе изменения скорости в процессе торможения текущее значение скорости w_2 по истечении времени запаздывания T_m ПАФ со-

ставляет

$$w_2 = w_1 - \frac{w_1}{t_m} T_m, \quad (3)$$

где t_m – время торможения привода.

Отдаваемая при этом энергия в процессе торможения

$$W_m = \frac{J}{2} (w_1^2 - w_2^2) = \frac{J}{2} \left[w_1^2 - \left(w_1 - \frac{w_1}{t_m} T_m \right)^2 \right] = \frac{J w_1^2 T_m}{2 t_m} (2 - T_m / t_m). \quad (4)$$

Обычно $t_m \gg T_m$, поэтому выражение (4) можно представить в виде

$$W_m = \frac{J w_1^2}{t_m} T_m = w_1 T_m (M_m + M_c), \quad (5)$$

где $t_m = J w_1 / (M_m + M_c)$ – время торможения; M_m, M_c – тормозной момент двигателя и момент сопротивления.

Полагая, что торможение начинается с $w_1 = w_n$ при моменте сопротивления $M_c = M_n$, имеем из (5)

$$W_m = T_m (I + 1) P_n, \quad (6)$$

где $I = M_m / M_n$ – отношение тормозного момента к номинальному, предельное значение которого соответствует перегрузочной способности двигателя.

Пренебрегая потерями, условие равенства отдаваемой кинетической энергии и энергии, запасаемой в конденсаторе, можно представить в виде

$$T_m (I + 1) P_n = 0,5 C_d [(U_d + \Delta U)^2 - U_d^2] = 0,5 C_d (2 U_d \Delta U + \Delta U^2), \quad (7)$$

где U_d и ΔU – начальное значение напряжения на конденсаторе и его превышение.

Согласно приведенного выражения

$$C_d = \frac{T_m (I + 1) P_n}{0,5 \Delta U_{\text{дон}} (2 U_d + \Delta U_{\text{дон}})}. \quad (8)$$

Так, например, при $U_d = 500$ В, $\Delta U_{\text{дон}} = 0,1 U_d$, $T_m = 0,001$ с на 1 кВт мощности двигателя требуется накопительный конденсатор емкостью

$$C_d \approx 35(I + 1) \text{ мкФ}, \quad (9)$$

что при $\lambda=(3,0-3,5)$ составляет (150–175) мкФ.

В системах группового питания электроприводов с общим входным выпрямителем на входе выражение (8) можно представить в виде

$$C_d = \frac{T_m \Delta P_m}{0,5 \Delta U_{\text{дон}} (2U_d + \Delta U_{\text{дон}})}, \quad (10)$$

где ΔP_m – избыточная мощность рекуперативного торможения над потребляемой.

Энергию, генерируемую двигателем в аварийном режиме при снятии управляющих импульсов с ключей инвертора, можно без большой погрешности определить в предположении постоянства потокосцепления ротора [8]. При этом в течение проводящего состояния обратных диодов, изменяющиеся по величине токи статора и ротора поддерживают потокосцепление ротора неизменным.

Непосредственно перед снятием управляющих импульсов с ключей инвертора потокосцепления статора Ψ_{10} и ротора Ψ_{20} в синхронно вращающейся системе координат определяются так:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{10} &= L_1 \bar{I}_{10} + L_m \bar{I}_{20}; \\ \bar{\Psi}_{20} &= L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\bar{I}_{10}, \bar{I}_{20}$ – результирующие векторы токов статора и ротора перед закрытием ключей инвертора; L_1, L_2, L_m – полная индуктивность статора, ротора и их взаимная индуктивность, найденная с учетом действия трех фаз двигателя.

После запирающих обратных диодов $\bar{I}_1 = 0$ и, следовательно, согласно (11) имеем

$$\bar{\Psi}_1 = L_m \bar{I}_2; \bar{\Psi}_2 = L_2 \bar{I}_2, \quad (12)$$

где \bar{I}_2 – результирующий вектор тока ротора после запирающих обратных диодов.

Согласно приведенным выражениям

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_2 L_m / L_2 = \bar{\Psi}_2 K_2. \quad (13)$$

А так как потокосцепление ротора остается неизменным, то

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_{20} K_2, \quad (14)$$

где $K_2 = L_m / L_2$ – коэффициент магнитной связи ротора.

В течение времени проводящего состояния обратных диодов векторная диаграмма потокосцеплений статора и ротора может быть представлена, как показано на рис. 4.

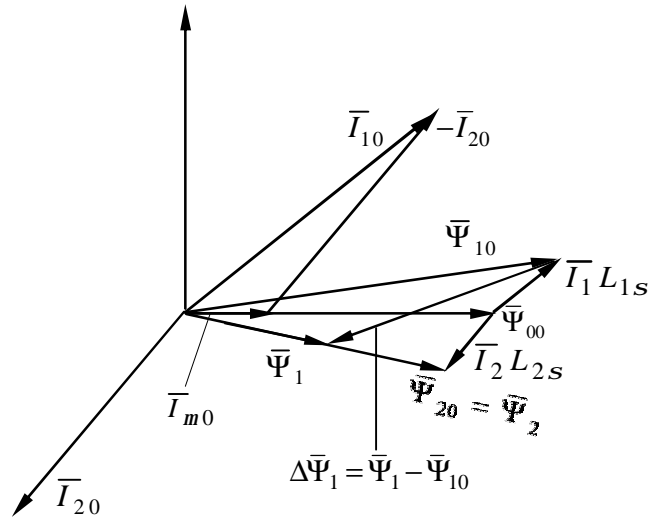


Рис.4. Векторная диаграмма потокосцепления статора и ротора до и после запираия ключей инвертора

В общем случае запасенная электромагнитная энергия перед снятием управляющих импульсов определяется как скалярное произведение соответствующих векторов [8]

$$W_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} [\bar{Y}_{10} \bar{I}_{10}^* + \bar{Y}_{20} \bar{I}_{20}^*], \quad (15)$$

где $\bar{I}_{10}^*, \bar{I}_{20}^*$ – сопряженные результирующие векторы токов статора и ротора до снятия управляющих импульсов.

После запираия ключей $\bar{I}_1 = 0; \bar{\Psi}_2 = \bar{\Psi}_{20}$ и, следовательно, запасенная энергия становится равной

$$W_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \bar{Y}_{20} \bar{I}_2^*. \quad (16)$$

Изменение магнитной энергии

$$W = W_0 - W_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} [\bar{\Psi}_{10} \bar{I}_{10}^* + \bar{\Psi}_{20} (\bar{I}_{20}^* - \bar{I}_2^*)]. \quad (17)$$

Разность $(\bar{I}_{20}^* - \bar{I}_2^*)$ в выражении (17) может быть найдена на основании постоянства потокосцепления ротора $L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20} = L_2 \bar{I}_2$, откуда

$$\bar{I}_{20} - \bar{I}_2 = \bar{I}_{10} L_m / L_2 = -\bar{I}_{10} K_2. \quad (18)$$

С учетом выражений (17) и (18) имеем:

$$\Delta W = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \left[(L_1 \bar{I}_{10} + L_m \bar{I}_{20}) \bar{I}_{10}^* - (L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20}) \frac{L_m}{L_2} \bar{I}_{10}^* \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \bar{I}_{10}^2 L_{1n}, \quad (19)$$

где $L_{1n} = L_1 - L_m^2 / L_2$ – переходная индуктивность обмотки статора.

Следовательно, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в аварийном режиме при запираии ключей инвертора в отношении изменения магнитной энергии может рассматриваться как катушка с индуктивностью, равной $\frac{3}{2} L_{1n}$.

В системах группового питания электроприводов в уравнение (19) следует подставлять суммарную переходную индуктивность $L_{n1\Sigma}$ обмоток статора и суммарный ток $I_{1\Sigma}$, потребляемый двигателями. При этом по аналогии с уравнениями (7) и (8) получим выражение для расчета емкости накопительного конденсатора для аккумуляирования электромагнитной энергии при аварийном снятии управляющих импульсов с ключей инверторов:

$$C_d = \frac{3}{2} \frac{I_{1\Sigma}^2 L_{n1\Sigma}}{\Delta U_{дон} (2U_d + \Delta U_{дон})}. \quad (20)$$

В расчетах нужно принимать большее из значений, найденных по выражениям (10) и (20).

Выводы

1. В системах группового питания регулируемых электроприводов от общих питающих шин постоянного тока емкость накопительного конденсатора может быть определена на основании равенства избыточной энергии рекуперативного торможения над потребляемой и энергии, запасаемой в конденсаторе в течение времени неуправляемого заряда емкости, равного времени запаздывания системы ПАФ.

2. В отношении изменения электромагнитной энергии асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в аварийном режиме при запираии ключей инвертора может рассматриваться как катушка с индуктивностью, которая в 1,5 раза больше переходной индуктивности обмотки статора.

Список литературы

1. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим

- преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем. // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. – 2003. – №1. – С.135–139.
2. Воробьев А.А., Колб А.А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения.// Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. – 2003. – №10. – С. 224–228.
3. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов, А.А. Сушников // Электротехника. – 2003. – №5. – С. 12–16.
4. Колб А.А. Пространственно - векторное управление групповым IGBT преобразователем для коррекции качества электроэнергии в системах электропривода с общими шинами постоянного тока // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2004. – Вип. 71. – С. 46–53.
5. Колб А.А. Релейно – векторное управление силовым активным фильтром в режиме компенсации мощности искажения // Науковий вісник НГУ. – 2004. – №3. – С. 68-74.
6. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Х.: Основа, 2004. – 210 с.
7. Malesani L., Rossetto L., Tenti P. AC/DC/AC PWM Converter with Reduced Energy Storage in the DC Link. IEEE Trans. Ind. Applicat, №2, 1985, p.287-292.
8. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 774 с.