

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ЦИКЛОКОММУТАТОРА

Б.Т. Кононов, В.Н. Щека  
(Харьковский университет Воздушных Сил)

*Предложено математическое описание переходных процессов в частотно-управляемом электроприводе на базе циклокоммутатора и асинхронного двигателя.*

***частотно-управляемый электропривод, циклокоммутатор, асинхронный двигатель***

**Постановка проблемы.** В частотно-управляемом электроприводе с циклокоммутатором в переходных режимах работы величина напряжения на коммутирующих конденсаторах может вырасти до недопустимого по условию работы электропривода значения. В конечном счете величина напряжения на коммутирующих конденсаторах определяется временем перезаряда и параметрами системы циклокоммутатор-асинхронный двигатель. Для установления взаимосвязи между величиной напряжения, параметрами системы и временем перезаряда конденсаторов проанализируем процессы, происходящие в частотно-управляемом электроприводе. С этой целью рассмотрим математическое описание переходных процессов в системе циклокоммутатор-асинхронный двигатель.

**Анализ литературы.** На сегодня наиболее распространен приближенный метод анализа [1], базирующийся на следующих допущениях: индуктивность сглаживающего дросселя на входе в циклокоммутатор принимается равной бесконечности; электродвигатель представляется последовательно соединенным звеном, включающим индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_1'$  и эдс ротора  $E_2$ . При этом активные сопротивления статора  $r_1$  и ротора  $r_2$  полагаются равными нулю. В [2 – 4] асинхронный двигатель представлен в виде активно-индуктивной нагрузки, описываемый звеном третьего порядка. Но представление двигателя пассивным звеном искажает реальную картину процессов, происходящих в частотно-управляемом электроприводе. Наиболее близким к реальным процессам является описание системы, представленное в работе [5], где однако, не учитывается наличие различных коммутационных этапов, свойственных рассматриваемой системе.

**Цель статьи.** Описать разработанную математическую модель системы циклокоммутатор-асинхронный двигатель.

**Основной материал.** Рассмотрим схему частотно-управляемого элект-

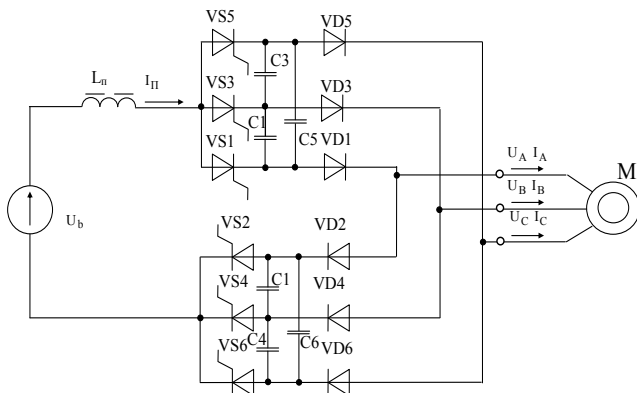


Рис. 1. Схема циклокоммутатора с отсекающими диодами

тропривода с циклокоммутатором (рис. 1). На интервале повторяемости коммутационных процессов, равном  $\pi/3$ , конфигурация силовой схемы меняется трижды в соответствии с тремя физическими этапами: I этап – этап коммутации токов в двух фазах нагрузки, соответствующий коммутации диодов данной, например, катодной группы циклокоммутатора, длительность этапа в угловых единицах выходной частоты –  $\gamma$ ; II этап – межкоммутационный этап, отсчитываемый от момента окончания коммутации диодов в одной, например, катодной группе до момента начала коммутации тиристоров в другой, например, анодной группе циклокоммутатора; III этап – линейного перезаряда конденсаторов анодной группы, отсчитываемый от момента коммутации тока в тиристорах анодной группы до момента начала коммутации диодов в этой же группе циклокоммутатора, длительность этапа определяется в угловых единицах выходной частоты –  $\lambda$ .

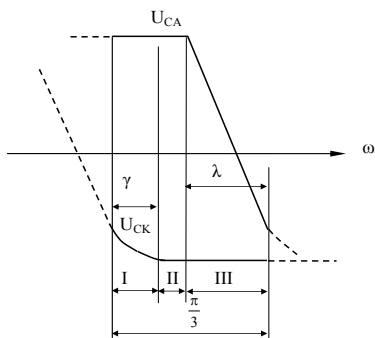


Рис. 2. Напряжения на коммутирующих конденсаторах анодной и катодной групп циклокоммутатора

при  $0 < \lambda \leq \pi/3 - \gamma$

существуют при условии, что  $\lambda + \gamma \leq \pi/3$ . Однако при изменении режима нагрузки в диапазоне номинальная нагрузка-холостой ход возможно существова-

ния напряжения на эквивалентных ( $C_{ЭКВ} = 1,5 C_1$ ) конденсаторах анодной ( $C_A$ ) и катодной ( $C_K$ ) групп циклокоммутатора, иллюстрирующий наличие рассмотренных выше этапов, показан на рис. 2.

Примем за начальный момент начало коммутации диодов  $VD_4, VD_6$ . Для этого момента конфигурация силовой схемы имеет вид, показанный на рис. 3. Предложенные схемы замещения, как следует из рис. 1, суще-

ние предложенных схем при  $\lambda + \gamma > \pi/3$  и даже при  $\lambda > \pi/3$ . Однако для ситуации, когда  $\lambda + \gamma > \pi/3$ , первому этапу коммутации соответствует третья схема, второму этапу коммутации – первая схема, а третьему этапу коммутации – вторая схема (рис. 3). Для третьего варианта первый этап отсутствует, второму этапу соответствует третья схема, а третьему – вторая (рис. 3).

Систему уравнений частотно-управляемого электропривода на базе циклокоммутатора и асинхронного электропривода представим в виде трех подсистем: двигателя, циклокоммутатора и звена постоянного тока. Уравнения асинхронного электродвигателя в операторной форме в системе координат с неподвижными осями статора имеют следующий вид:

$$\begin{cases} U_1 = I_1 \cdot r_1 + p\psi_1; \\ 0 = I_2 \cdot r_2 + (p - jv) \cdot \psi_2; \\ \psi_1 = I_1 \cdot X_1 + I_2 \cdot X_0; \\ \psi_2 = I_1 \cdot X_0 + I_2 \cdot X_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha = \omega / \omega_n$  – частота вращения ротора (относительные единицы);  $v = \alpha - \omega_2(r_2 / X_C)$  – скольжение ротора;  $p$  – символ операции дифференцирования;  $r_1, r_2, X_1, X_2$  и  $X_0$  – параметры схемы замещения двигателя (с учетом наличия активных сопротивлений статора и ротора). Уравнения системы (1) записаны в относительных единицах, приведены к номинальным данным двигателя и в синхронном масштабе времени, где  $t_\delta = X_2 / (\omega_n r_2)$ .

Введя понятие переходного индуктивного сопротивления статора  $X'_1 = X_1 - X_0^2 / X_2$  и переходя к  $(d - q)$  системе координат, получим после преобразований следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} U_d = I_d(r_1 + pX'_1) + \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2d}; \\ U_q = I_q(r_1 + pX'_1) + \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q}; \end{cases} \quad \begin{cases} I_d \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\psi_{2q}; \\ I_q \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\psi_{2d}. \end{cases} \quad (2)$$

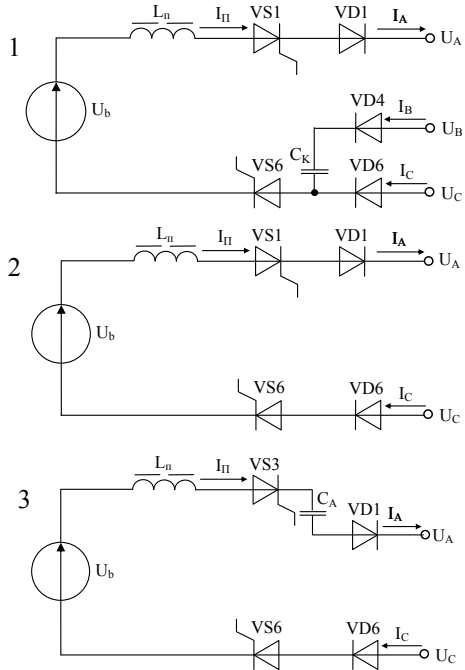


Рис. 3. Схемы замещения на трех этапах для первого варианта структур  $0 < \lambda \leq \pi/3 - \gamma$

Совместив ось  $d$  с осью той фазы, в которой в рассматриваемом переходе отсутствует коммутация, например с осью  $A$ , т.е. исходя из того, что  $U_A = U_d$ ;  $U_B = -\frac{1}{2}U_d + \frac{\sqrt{3}}{2}U_q$ ;  $U_C = -\frac{1}{2}U_d - \frac{\sqrt{3}}{2}U_q$ , получим выражения для линейных напряжений двигателя:

$$U_{AB} = \frac{3}{2}I_d(r_1 + pX_1') - \frac{\sqrt{3}}{2}I_q(r_1 + pX_1') + \frac{3}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q};$$

$$U_{BC} = \sqrt{3}I_q(r_1 + pX_1') + \sqrt{3}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q}; \quad (3)$$

$$U_{CA} = -\frac{3}{2}I_d(r_1 + pX_1') - \frac{\sqrt{3}}{2}I_q(r_1 + pX_1') - \frac{3}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q},$$

где учтено, что  $I_A = I_d$ ,  $I_B = -\frac{1}{2}I_d + \frac{\sqrt{3}}{2}I_q$ ,  $I_C = -\frac{1}{2}I_d - \frac{\sqrt{3}}{2}I_q$ .

В соответствии с первой схемой (рис. 3):

$$X_C \int I_B dt = U_{BC}. \quad (4)$$

Поскольку на рассматриваемом интервале коммутация в фазе  $A$  отсутствует, т.е.  $I_A = I_{II}$ , а значит  $I_d = I_{II}$ . С учетом этого представим (4) в виде

$$\frac{X_C}{2} \int (I_{II} - \sqrt{3}I_q) dt = U_{BC}. \quad (5)$$

Уравнение звена постоянного тока для первого варианта структур имеет на I-м и II-м этапах следующий вид:

$$U_{CA} + U_b = X_{II} p I_{II}. \quad (6)$$

Уравнение (6) можно переписать для I-го этапа в виде:

$$X_{II} p I_{II} = U_b - \frac{3}{2}I_{II}(r_1 + pX_1') - \frac{\sqrt{3}}{2}I_q(r_1 + pX_1') - \frac{3}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q}. \quad (7)$$

Для второго этапа с учетом того, что  $I_q = \frac{I_{II}}{\sqrt{3}}$  ( $I_B = 0$ ) получим:

$$(X_{II} + 2X_1')pI_{II} = U_b - 2r_1 \cdot I_{II} - \frac{3}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q} - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q}. \quad (8)$$

Для третьего этапа запишем уравнение звена постоянного тока в виде:

$$U_{CA} + U_b - X_C \int I_{II} dt = X_{II} p I_{II}, \quad (9)$$

из которого получаем

$$(X_{II} + 2X_1')pI_{II} = U_b - 2r_1 \cdot I_{II} - \frac{3}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q} - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{X_0}{X_2}p\psi_{2q} - X_C \int I_{II} dt. \quad (10)$$

Полная система уравнений для первого варианта структур запишется в виде следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{X_C}{2} \int (I_{\Pi} - \sqrt{3}I_q) dt - \sqrt{3} \left[ I_q (r_1 + pX_1') + \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q} \right] = 0; \\ I_{\Pi} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\psi_{2q}; \\ I_q \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\psi_{2d}; \\ X_{\Pi} p I_{\Pi} = U_b - \frac{3}{2} I_{\Pi} (r_1 + pX_1') - \frac{\sqrt{3}}{2} I_q (r_1 + pX_1') - \frac{3}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q}; \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\Pi} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\psi_{2q}; \\ \frac{I_{\Pi}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\psi_{2d}; \\ (X_{\Pi} + 2X_1') p I_{\Pi} = U_b - 2r_1 \cdot I_{\Pi} - \frac{3}{2} \cdot \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q}; \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\Pi} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\psi_{2q}; \\ \frac{I_{\Pi}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\psi_{2d}; \\ (X_{\Pi} + 2X_1') p I_{\Pi} = U_b - 2r_1 \cdot I_{\Pi} - \frac{3}{2} \cdot \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q} - X_C \int I_{\Pi} dt. \end{array} \right. \quad (13)$$

Таким образом, общая система уравнений разбита на три подсистемы (11) – (13) в соответствии с тремя этапами процессов на интервале повторяемости  $\pi/3$ . Ее решение будем искать методом припасовывания значений на границах этапов. Решение системы на интервале повторяемости  $\pi/3$  циклически повторяется до получения сходимости в начальных значениях двух последующих циклов.

На первом итерационном цикле в качестве начальных используются значения, полученные по приближенным аналитическим выражениям, найденным из (11) – (13) для установившегося режима работы:

$$I_{\Pi 0} = \frac{\psi_2}{X_0} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\cos Q}; \quad I_{q0} = -\frac{I_{\Pi 0}}{\sqrt{3}}; \quad \gamma_0 = \alpha \cdot \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2X_1'}{X_C}}. \quad (14)$$

Начальное значение потокосцепления ротора будет равно

$$\psi_{20} = \psi_2 \cdot e^{-j \left( \arctg \alpha_2 + \frac{2}{3} \gamma_0 \right)},$$

откуда при  $\psi_2 = 1$  получим в проекциях на оси d и q

$$\psi_{2d0} = \cos\left(\arctg\omega_2 + \frac{2}{3}\gamma_0\right); \quad \psi_{2q0} = -\sin\left(\arctg\omega_2 + \frac{2}{3}\gamma_0\right). \quad (15)$$

Начальное значение напряжения на конденсаторе на первом этапе и начальное значение производной тока циклокоммутатора будут равны:

$$\begin{aligned} U_{BC_0} = & \sqrt{3}I_{q0}r_1 + \sqrt{3}X_1'(pI_{q0}) + \sqrt{3}\frac{X_0}{X_2}(p\psi_{2q0}) = -I_{\Pi 0} \cdot r_1 + X_1'(pI_{\Pi 0}) + \\ & + \sqrt{3}\frac{X_0}{X_2}\left(-\frac{I_{\Pi 0}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_0}{X_2} \cdot r_2 - \psi_{2q0}\frac{r_2}{X_2} + v\psi_{2d0}\right); \\ (pI_{\Pi 0}) = & \left(U_b - I_{\Pi 0}\left(r_1 + \frac{X_0^2}{X_2^2}r_2\right) - \psi_{2d0}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{X_0}{X_2}v - \frac{3}{2}\frac{X_0}{X_2^2}r_2\right) - \psi_{2q0}\left(\frac{3}{2}\frac{X_0}{X_2}v + \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{X_0}{X_2^2}r_2\right)\right) : \\ & : (X_{\Pi} + X_1'). \end{aligned} \quad (16)$$

Значение интеграла  $X_C \int I_{\Pi} dt$  в (13) равно напряжению на конденсаторе  $U_{Cm}$  в конце этапа коммутации токов в фазах, взятому с обратным знаком. Следует заметить, что на всех циклах расчета системы уравнений на трех этапах остаются неизменными, но решение на каждом расчетном цикле надо проводить с учетом новых начальных значений, так как при очередной коммутации система координат скачком перемещается на угол  $\pi/3$ . При этом изменяются значения проекций векторов на оси d и q.

Длительность 1 этапа (момент окончания) определяется из условия:

$$I_q = I_{\Pi} / \sqrt{3} \quad (I_B = 0).$$

Длительность второго этапа равна  $\pi/3 - \lambda - \gamma$ , где  $\gamma$  – длительность первого этапа;  $\lambda$  – длительность третьего этапа, определяемая приближенно.

Так как значение  $\lambda$  определяется приближенно на всех циклах расчета, то после достижения сходимости в начальных значениях двух последующих циклов проводится проверка правильности выбора  $\lambda$ . Для этого сравнивается величина напряжения на конденсаторе  $U_{C_{III}}$  и линейного напряжения двигателя  $U_{AB_{III}}$  в конце третьего этапа последнего расчетного цикла. Корректируя величину  $\lambda$  в большую или меньшую сторону в зависимости от знака рассогласования  $U_{C_{III}}$  и  $-U_{AB_{III}}$ , повторяем расчет до достижения условия  $U_{C_{III}} = -U_{AB_{III}}$ .

Методика составления уравнений и метод расчета процессов для второго и третьего варианта структур не отличается от изложенных выше.

Для второго варианта имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{X_{CK}}{2} \int (I_{II} - \sqrt{3}I_q) dt - \sqrt{3} \left[ I_q (r_1 + pX_1') + \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q} \right] = 0; \\ I_{II} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\psi_{2q}; \\ I_q \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\psi_{2d}; \\ X_{II} p I_{II} = U_b - \frac{3}{2} I_{II} (r_1 + pX_1') - \frac{\sqrt{3}}{2} I_q (r_1 + pX_1') - \\ - \frac{3}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q}; \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{X_{CK}}{2} \int (I_{II} - \sqrt{3}I_q) dt - \sqrt{3} \left[ I_q (r_1 + pX_1') + \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q} \right] = 0; \\ I_{II} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\psi_{2q}; \\ I_q \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\psi_{2d}; \\ X_{II} p I_{II} = U_b - \frac{3}{2} I_{II} (r_1 + pX_1') - \frac{\sqrt{3}}{2} I_q (r_1 + pX_1') - \frac{3}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2d} - \\ - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q} - X_{CA} \int I_{II} dt; \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{II} \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2d} \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\psi_{2q}; \\ \frac{I_{II}}{\sqrt{3}} \frac{X_0}{X_2} r_2 = \psi_{2q} \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\psi_{2d}; \\ (X_{II} + 2X_1') p I_{II} = U_b - 2r_1 I_{II} \frac{3}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{X_0}{X_2} p\psi_{2q} - X_{CA} \int I_{II} dt. \end{array} \right. \quad (19)$$

Для удобства различия конденсаторов при определении начальных условий введены индексы «а» (анодная группа) и «к» (катодная группа). Длительность первого этапа (в радианах текущей частоты)  $\omega \cdot t_1 = \pi/3 - \lambda$ ; длительность второго этапа (момент окончания) определяется по выполнению условия  $I_q = I_{II}/\sqrt{3}$  ( $I_B = 0$ ); длительность третьего этапа –  $(\lambda - \omega \cdot t_2)$ , где  $\omega \cdot t_2$  – расчетная длительность второго этапа.

Системы уравнений для третьего варианта запишем следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{X_{CK}}{2} \int (I_{II} - \sqrt{3}I_q) dt - \sqrt{3} \left[ I_q (r_1 + pX_1') + \frac{X_0}{X_2} p\Psi_{2q} \right] = 0; \\ I_{II} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \Psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\Psi_{2q}; \\ I_q \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \Psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\Psi_{2d}; \\ X_{II} p I_{II} = U_b - \frac{3}{2} I_{II} (r_1 + pX_1') - \frac{\sqrt{3}}{2} I_q (r_1 + pX_1') - \frac{3}{2} \frac{X_0}{X_2} p\Psi_{2d} \\ \quad - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{X_0}{X_2} p\Psi_{2q} - X_{CA} \int I_{II} dt; \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{II} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \Psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\Psi_{2q}; \\ \frac{I_{II}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \Psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\Psi_{2d}; \\ (X_{II} + 2X_1') p I_{II} = U_b - 2r_1 I_{II} - \frac{3}{2} \frac{X_0}{X_2} p\Psi_{2d} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{X_0}{X_2} p\Psi_{2q} - X_{CA} \int I_{II} dt; \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{II} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \Psi_{2d} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) + v\Psi_{2q}; \\ \frac{I_{II}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_0}{X_2} r_2 = \Psi_{2q} \cdot \left( \frac{r_2}{X_2} + p \right) - v\Psi_{2d}; \\ (X_{II} + 2X_1') p I_{II} = U_b - 2r_1 \cdot I_{II} - \frac{3}{2} \cdot \frac{X_0}{X_2} p\Psi_{2d} - \\ \quad - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{X_0}{X_2} p\Psi_{2q} - X_{CA} \int I_{II} dt + X_{CK} \int I_{II} dt. \end{array} \right. \quad (22)$$

Длительность первого этапа (момент окончания) определяется по выполнению условия  $I_q = I_{II}/\sqrt{3}$ ; длительность второго этапа –  $(2\pi/3 - \lambda - \omega \cdot t_1)$ , где  $\omega \cdot t_1$  – расчетная длительность первого этапа; длительность третьего этапа –  $(\lambda - \pi/3)$ .

Решение полученных систем уравнений для всех вариантов структур проводилось численным интегрированием методом Рунге-Кутты четвертого порядка на ЭВМ. Варьируемыми величинами при расчете являлись скольжение двигателя  $\omega_2$ , характеризующие изменение режима нагрузки привода от холостого хода до перегрузки по току, и параметры схемы  $X_C$  и  $X_{II}$  характеризующее соответственно емкость эквивалент-



ного коммутирующего конденсатора и индуктивность сглаживающего дросселя.

Результаты расчетов позволили оценить погрешность приближенного аналитического метода. На рис. 4 приведены результаты расчета погрешности в определении величины напряжения на конденсаторе  $U_{Cm}$  в конце коммутации токов в фазах. Уточненный численный расчет дает несколько меньшие значения напряжения  $U_{Cm}$ , что объясняется, прежде всего тем, что эдс двигателя не остается неизменной на интервале коммутации токов в фазах, а также тем, что уточняется длительность интервала  $\gamma$ .

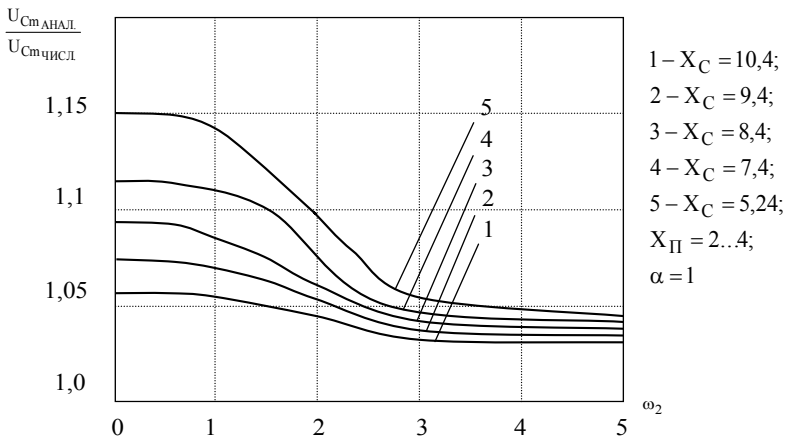


Рис. 4. Погрешность расчета величины напряжения на конденсаторе  $U_{Cm}$  аналитическим методом в сравнении с расчетом на ЭВМ

Максимальная погрешность соответствует режиму холостого хода и увеличивается с уменьшением  $X_C$ , т.к. с ростом емкости коммутирующих конденсаторов увеличивается величина  $\gamma$  и погрешность от ее приближенной оценки.

На рис. 5 приведены результаты расчета погрешности определения величины  $(\lambda + \gamma)$  – суммарной длительности двух этапов перезаряда коммутирующих конденсаторов.

Основную роль в уменьшении величины  $(\lambda + \gamma)$  по сравнению с приближенным аналитическим расчетом играет уменьшение  $\lambda$ , что связано, во-первых, с тем, что разряд происходит от меньшего напряжения

(в соответствии с рис. 5), а во-вторых, с тем, что разряд происходит более быстро за счет наличия пульсаций в токе  $I_{II}$ . Последняя причина наиболее существенна, т.е. снятие допущения о бесконечной величине индуктивности сглаживающего дросселя приводит к уменьшению величины  $(\lambda + \gamma)$ .

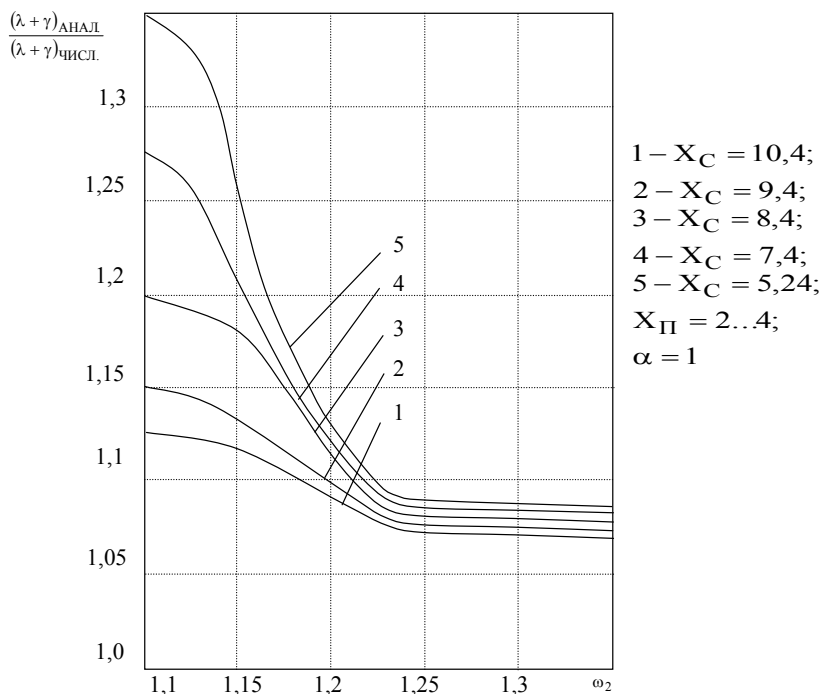


Рис. 5. Погрешность расчета величины суммарного времени перезарядов конденсаторов  $(\lambda + \gamma)$  аналитическим методом в сравнении с расчетом на ЭВМ

Наибольшая погрешность соответствует режиму холостого хода ( $\omega_2 = 0$ ), в котором пульсации  $I_{II}$  максимальны. В этом же режиме наиболее существенно проявляется влияние на  $(\lambda + \gamma)$  изменение емкости коммутирующих конденсаторов – с уменьшением  $X_C$  погрешность аналитического метода увеличивается за счет роста пульсаций. Аналогичным образом влияет и изменение величины  $X_{II}$ , однако при изменении индуктивности сглаживающего дросселя в реальных пределах

( $X_{II} = 2..4$ ) это влияние незначительно и им можно пренебречь. Это, в свою очередь, позволяет произвести оценку оптимального значения  $X_C$  и выбор коммутирующего конденсатора независимо от величины индуктивности сглаживающего дросселя.

**Выводы:** 1. Получила дальнейшее развитие математическая модель системы циклокоммутатор-асинхронный двигатель, учитывающая как цикличность работы преобразователя частоты, так и различные этапы коммутации его вентиляей.

2. Приведена сравнительная оценка результатов расчета циклокоммутатор-асинхронный электродвигатель приближенным и точным методом. Наибольшая погрешность при определении величины напряжения составляет 15% и имеет место в режиме холостого хода. Погрешность при определении времени перезаряда коммутирующих конденсаторов лежит в диапазоне от 12 до 35%.

3. По результатам расчетов получено, что при уменьшении емкостного сопротивления коммутирующих конденсаторов, вызванного увеличением емкости на 40%, перенапряжение при номинальной нагрузке снижается на 15%, а при полукратной перегрузке перенапряжения снижается до 18%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аранчий Г.В., Жемеров Г.Г., Эпштейн И.И. Тиристорные преобразователи частоты для регулируемых электроприводов. – М.: Энергия, 1968. – 125 с.
2. Ward E.E. Inverter suitable for operation over a range of frequency // *Proceedings of the IEE*. – Vol. 111, № 8. – P. 1423 – 1424.
3. Умаров Б.У. Расчет трехфазного инвертора с отсекающими вентилями при работе на асинхронный двигатель методом гармонических составляющих // *Изв. вузов МВ ССО СССР. Энергетика*. – 1976. – № 7. – С. 47–53.
4. Шмаров Б.У. Анализ установившегося режима инвертора с отсекающими вентилями при работе на асинхронный двигатель // *Электричество*. – 1977. – № 8. – С. 54 – 57.
5. Ермуратский В.В. Характеристики реального инвертора тока с искусственной коммутацией по третьей гармонике // *Электроэнергетика и автоматика*. – Кишинев: АН МССР. – 1968. – Вып. 3. – С. 70 – 76.

Поступила 26.08.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор Б.Ф. Самойленко,  
Харьковский университет Воздушных Сил.

---