

# АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЙ ПРИ НУЛЕВОМ ТОКЕ – ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ю.А.Денисов, А.С.Ревко

Черниговский государственный технологический университет

Украина, 14027, г. Чернигов, ул. Шевченко, 95, ЧГТУ, кафедра “Промышленная электроника”

Тел. (04622) 3-77-17, E-mail: asr@barby.stu.cn.ua, den@barby.stu.cn.ua

**Annotation – In this paper the analysis of electromagnetic processes in a system quasiresonant a pulse converter switched at a zero current - a drive of a direct current is carried out.**

**Key words – pulse converters switched at zero current (QRPC-SZC), D.C. motor.**

Квазирезонансные импульсные преобразователи, переключаемые при нулевом токе (КРИП-ПНТ) весьма перспективны для применения в электроприводах постоянного тока в качестве силовых регулирующих звеньев. Они обеспечивают высокую плавность регулирования скорости электропривода в широком диапазоне, имеют высокие энергетические и удельные характеристики, а также хорошую электромагнитную совместимость с сетью промышленного тока.

Отмеченные достоинства КРИП-ПНТ особенно важны при построении систем высокоточного электропривода и, в частности, при разработке систем электропривода аппаратов точной магнитной записи, где требования по удельным характеристикам силовых преобразователей, по уровню излучаемых ими помех и электромагнитной совместимости весьма высоки.

К сожалению, на сегодняшний день, в периодической литературе отсутствует достаточно строгий анализ работы КРИП-ПНТ на двигатель постоянного тока (ДПТ). В [1] выполнено исследование работы КРИП-ПНТ на статистическую RLC-нагрузку по постоянной составляющей. Более строгий анализ для этого случая выполнен в работе [2], где на основе решения разностного уравнения учтено влияние пульсаций выходного напряжения и тока на статические характеристики преобразователя.

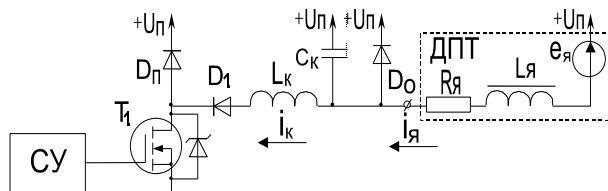


Рис.1 КРИП-ПНТ с нагрузкой в качестве ДПТ

Поскольку в дальнейшем мы будем иметь в виду высокоточный электропривод постоянного тока, то анализ электромагнитных процессов в его регулирующем звене выполним с учетом пульсаций тока. Подключение к выходу КРИП-ПНТ двигателя постоянного тока, рис.1, в отличие от статической нагрузки, вызывает ряд специфических особенностей. В первую очередь это связано с наличием противо-э.д.с. двига-

теля и его изменениями в процессе регулирования скорости, а также в процессе пуска. Противо-э.д.с. двигателя будет оказывать влияние на напряжение конденсатора контура а следовательно и на момент времени, когда ток силового транзистора достигает нулевого значения. Если колебания нагрузки будет происходить в широком диапазоне, то, вероятно, возникнет необходимость в устройствах контроля момента нулевого тока резонансного контура. Эта необходимость особенно заметна при пуске двигателя, а также при резких скачках нагрузки.

Выход КРИП-ПНТ из режима переключения при нулевом токе является весьма нежелательным, исходя из требований к.п.д.

Помимо влияния противо-э.д.с. двигателя на процесс заряда конденсатора в режиме непрерывного тока якоря, отдельного исследования заслуживает режим прерывистого тока, который может возникнуть при низкой частоте коммутации или же в электрической машине с малой индуктивностью цепи якоря. В этом режиме цепь якоря отключается от источника питания, происходит естественное торможение машины, в процессе которого противо-э.д.с. изменяет свой знак, что может привести к изменению полярности напряжения на конденсаторе контура. В результате этого после восстановления режима непрерывного тока нарушаться естественный для КРИП-ПНТ процесс заряда конденсатора контура и преобразователь может выйти из режима переключения при нулевом токе.

К сожалению, при аналитическом исследовании электромагнитных процессов в системе КРИП-ПНТ – двигатель постоянного тока особенности, связанные с влиянием противо-э.д.с. на работу преобразователя в режиме непрерывного и прерывистого тока, установить, практически, невозможно. Это связано с тем, что анализ процессов в такой системе в общем, виде возможен лишь при допущении о неизменности противо-э.д.с. двигателя.

В этой связи в дальнейшем будем использовать следующий подход для решения поставленной задачи. Вначале в общем виде выполним исследование электромагнитных процессов с общепринятым допущением о постоянстве противо-э.д.с., а затем посредством электронного моделирования установим влияние про-

тивно-э.д.с. на процесс коммутации при резких скачках нагрузки и в режиме прерывистого тока.

Большинство расчетов произведено на ПЭВМ с помощью математического редактора Maple V Release 5.

Временные диаграммы работы КРИП-ПНТ на ДПТ представлены на рис.2.

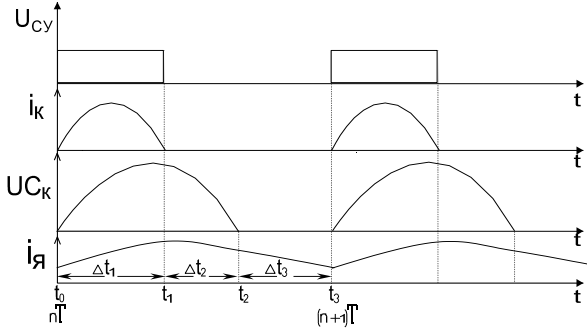


Рис.2 Временные диаграммы работы КРИП-ПНТ

Для первого коммутационного интервала  $t_0 \leq t \leq t_1$ , на котором происходит резонансный заряд конденсатора  $C_k$  справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} i_k(p) = i_a(p) + pCU_c(p) \\ U_{II} \frac{1}{p} = L_k p i_k(p) + U_c(p) + U_c(t_0) \frac{1}{p} \\ U_c(p) = pL_a i_a(p) - L_a i_a(t_0) + i_a(p)R_a + \frac{e_a}{p} - U_c(t_0) \frac{1}{p} \end{cases}, \quad (1)$$

где:

$i_a(t_0)$  - ток якоря в начале первого интервала;

$U_c(t_0)$  - напряжение на конденсаторе контура в начале первого интервала.

В системе уравнений (1) учтено, что силовой ключ идеальный, противо-э.д.с. двигателя  $e_a = const$ , коммутация силового ключа происходит последовательно на периоды с номером  $n=0,1,2,3\dots$

Решая систему уравнений (1) для произвольного периода "n" имеем следующие значения неизвестных токов и напряжения:

ток якоря:

$$i_a(\bar{t}) = -\frac{\omega_k^2(U_{II} - e_a)}{L_a p_2(r^2 + m^2)} + F_a'' e^{\alpha(\bar{t}-n)} + (B_a' \sin \bar{\omega}_1(\bar{t}-n) + C_a' \cos \bar{\omega}_1(\bar{t}-n)) e^{\alpha_2(\bar{t}-n)} + i_a(n) (F_a'' e^{\alpha(\bar{t}-n)} + (B_a'' \sin \bar{\omega}_1(\bar{t}-n) + C_a'' \cos \bar{\omega}_1(\bar{t}-n)) e^{\alpha_2(\bar{t}-n)}), \quad n \leq \bar{t} \leq n + \gamma_1; \quad (2)$$

ток контура:

$$i_k(\bar{t}) = -\frac{\omega_k^2(U_{II} - e_a)}{p_2 L_a (r^2 + m^2)} + (F_k' + i_a(n) F_k'') e^{\alpha(\bar{t}-n)} + ((B_k' + i_a(n) B_k'') \sin \bar{\omega}_1(\bar{t}-n) - (C_k' + i_a(n) C_k'') \cos \bar{\omega}_1(\bar{t}-n)) e^{\alpha_2(\bar{t}-n)}, \quad n \leq \bar{t} \leq n + \gamma_1; \quad (3)$$

напряжение на конденсаторе контура:

$$u_c(\bar{t}) = -\frac{\omega_k^2(U_{II} - U_c(n))}{p_2 T_a (r^2 + m^2)} + (F_c' + i_a(n) F_c'') e^{\alpha(\bar{t}-n)} + ((B_c' + i_a(n) B_c'') \sin \bar{\omega}_1(\bar{t}-n) + (C_c' + i_a(n) C_c'') \cos \bar{\omega}_1(\bar{t}-n)) e^{\alpha_2(\bar{t}-n)}, \quad n \leq \bar{t} \leq n + \gamma_1; \quad (4)$$

где:

$$F_a' = \frac{\omega_k^2(U_{II} - e_a) + p_2^2(U_c(n) - e_a)}{L_a p_2 z_1}, \quad F_a'' = \frac{p_2^2 + \omega_k^2}{z_1},$$

$$B_a' = \frac{(r^2 - m^2 - r p_2) \omega_k^2}{m L_a z_1 (r^2 + m^2)} (U_{II} - e_a) + \frac{(r^2 + m^2 - r p_2)}{L_a m z_1} (U_c(n) - e_a), \\ B_a'' = \frac{(r - p_2) \omega_k^2 + r(m^2 + r^2) + p_2(m^2 - r^2)}{m z_1},$$

$$C_a' = \frac{(p_2 - 2r) \omega_k^2}{L_a z_1 (r^2 + m^2)} (U_{II} - e_a) - \frac{p_2}{L_a z_1} (U_c(n) - e_a), \quad C_a'' = \frac{r^2 + m^2 - \omega_k^2 - 2r p_2}{z_1},$$

$$F_k' = \frac{(1 + p_2 T_a)}{z_1 L_k T_a} (U_{II} - U_c(n)) + \frac{\omega_k^2}{p_2 z_1 L_a} (U_{II} - e_a), \quad F_k'' = C_k'' = \frac{\omega_k^2}{z_1},$$

$$B_k' = \frac{(r^2 + m^2 - r p_2) T_a + r - p_2}{L_k T_a m z_1} (U_{II} - U_c(n)) + \frac{(r^2 - m^2 - r p_2) \omega_k^2}{m z_1 L_a (m^2 + r^2)} (U_{II} - e_a),$$

$$B_k'' = \frac{(r - p_2) \omega_k^2}{m z_1}, \quad C_k' = \frac{1 + p_2 T_a}{L_k T_a z_1} (U_{II} - U_c(n)) + \frac{(2r - p_2) \omega_k^2}{z_1 L_a (m^2 + r^2)} (U_{II} - e_a),$$

$$F_c' = \frac{(1 + p_2 T_a) \omega_k^2}{p_2 T_a z_1} (U_{II} - U_c(n)) + \frac{\omega_k^2}{z_1} (e_a - U_c(n)), \quad F_c'' = -\frac{p_2}{C z_1},$$

$$B_c' = \left( \frac{r^2 - m^2 - r p_2}{T_a (r^2 + m^2)} + r - p_2 \right) \frac{\omega_k^2}{m z_1} (U_{II} - U_c(n)) + \frac{r - p_2}{m z_1} \omega_k^2 (e_a - U_c(n)),$$

$$C_c'' = \frac{p_2}{z_1 C}, \quad C_c' = \frac{(p_2 - 2r - (r^2 + m^2) T_a) \omega_k^2}{z_1 T_a (r^2 + m^2)} (U_{II} - U_c(n)) + \frac{\omega_k^2}{z_1} (U_c(n) - e_a),$$

$$B_c'' = \frac{r p_2 - r^2 - m^2}{m z_1 C}, \quad \omega_k = \frac{1}{\sqrt{L_a C}}, \quad \omega_{ka} = \frac{1}{\sqrt{L_a C}}, \quad T_a = \frac{L_a}{R_a},$$

$$p_2 = -\left( -D + \frac{1}{3T_a} \right), \quad r = -\left( \frac{1}{2} D + \frac{1}{3T_a} \right), \quad m = \frac{\sqrt{3}}{2} D',$$

$$z_1 = (p_2 - r)^2 + m^2 = (r - p_2)^2 + m^2, \quad D = \frac{1}{6} A - \frac{2 \left( \omega_{ka}^2 + \omega_k^2 - \frac{1}{3T_a^2} \right)}{A},$$

$$A = \sqrt[3]{\frac{1}{T_a} \left( 36(\omega_{ka}^2 - 2\omega_k^2) - \frac{8}{T_a^2} + 12\omega_k^2 \sqrt{3 \left( 4T_a^2 \omega_k^2 (k+1)^3 - k(k+20) + 8 + \frac{4}{T_a^2 \omega_k^2} \right)} \right)},$$

$$k = \frac{L_k}{L_a}, \quad \alpha_1 = T p_2, \quad \alpha_2 = T r, \quad \bar{\omega}_1 = \omega_1 T, \quad \omega_1 = m,$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta t_1}{T}, \quad D' = \frac{1}{6} A + \frac{2 \left( \omega_{ka}^2 + \omega_k^2 - \frac{1}{3T_a^2} \right)}{A}, \quad \bar{t} = \frac{t}{T}, \quad \Delta t_1 = t_1 - t_0.$$

$T$  - период работы ключа КРИП,

$i_a(n)$  - ток якоря в начале первого интервала работы КРИП,

$U_c(n)$  - напряжение на конденсаторе контура в начале первого интервала работы КРИП.

Первый интервал работы КРИП-ПНТ заканчивается в тот момент, когда ток контура снизится до нулевого значения. Если пренебречь влиянием цепей нагрузки на резонансный контур (это можно сделать в случае, когда постоянная времени цепи нагрузки гораздо больше постоянной времени резонансного контура) тогда время первого интервала работы преобразователя можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t_1 = \pi \sqrt{L_k C}. \quad (5)$$

Для второго коммутационного интервала  $t_1 \leq t \leq t_2$ , на котором происходит разряд конденсатора  $C_k$  через нагрузку справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} U_c(p) = U_c(t_1) \frac{1}{p} - i_n(p) \frac{1}{pC}, \\ U_c(p) = pL_n i_n(p) - L_n i_n(t_1) + i_n(p) R_n + \frac{e_n}{p}. \end{cases} \quad (6)$$

где:

$i_n(t_1)$  - ток якоря в конце первого интервала и в начале второго;

$U_c(t_1)$  - напряжение на конденсаторе контура в конце первого интервала и в начале второго.

Решая систему уравнений (6) для произвольного периода "n" имеем следующие значения неизвестных токов и напряжения:

ток якоря:

$$i_n(\bar{t}) = \left( i_n(n+\gamma_1) \cos \bar{\omega}_2(\bar{t}-n-\gamma_1) + \frac{U_c(n+\gamma_1) - 0.5i_n(n+\gamma_1) - e_n}{z_n} \sin \bar{\omega}_2(\bar{t}-n-\gamma_1) \right) e^{-0.5\alpha(\bar{t}-n-\gamma_1)} \quad (7)$$

$$n + \gamma_1 \leq \bar{t} \leq n + \gamma_1 + \gamma_2;$$

ток контура на этом интервале будет отсутствовать по условию работы КРИП-ПНТ;

напряжение на конденсаторе контура:

$$u_c(\bar{t}) = e_n + \left( U_c(n+\gamma_1) - e_n \right) \cos \bar{\omega}_2(\bar{t}-n-\gamma_1) + \frac{(U_c(n+\gamma_1) - e_n) R_n + 2 \frac{L_n}{C} i_n(n+\gamma_1)}{2z_n} \sin \bar{\omega}_2(\bar{t}-n-\gamma_1) \left. \right\} e^{-0.5\alpha(\bar{t}-n-\gamma_1)} \quad (8)$$

$$n + \gamma_1 \leq \bar{t} \leq n + \gamma_1 + \gamma_2;$$

где:

$$\omega_2 = \sqrt{\omega_{\text{кн}}^2 - \frac{1}{4T_n^2}}, \quad z_n = L_n \omega_2 = \sqrt{\frac{L_n}{C} - \frac{R_n^2}{4}}, \quad \alpha = \frac{T}{T_n}, \quad \bar{\omega}_2 = \omega_2 T,$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta t_2}{T}, \quad \Delta t_2 = t_2 - t_1.$$

$$u_c(n+\gamma_1) = -\frac{\omega_k^2(U_n - U_c(n))}{p_2 T_n (r^2 + m^2)} + F_c' e^{\alpha \gamma_1} + (B_c' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_c' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} + i_n(n) (F_c'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_c'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_c'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1}),$$

$$i_n(n+\gamma_1) = -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} + i_n(n) (F_n'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1}).$$

Для третьего коммутационного интервала  $t_2 \leq t \leq t_3$ , на котором происходит разряд энергии, накопленной в индуктивности якоря, справедливо уравнение:

$$0 = pL_n i_n(p) - L_n i_n(t_2) + i_n(p) R_n + \frac{e_n}{p} \quad (9)$$

Решая уравнение (9) для произвольного периода "n" имеем следующее значение неизвестного тока якоря (ток контура и напряжение на конденсаторе контура на этом интервале равны нулю по условию работы КРИП-ПНТ):

$$i_n(\bar{t}) = -\frac{e_n}{R_n} + \left( \frac{e_n}{R_n} + i_n(n+\gamma_1+\gamma_2) \right) e^{-\alpha(\bar{t}-n-\gamma_1-\gamma_2)} \quad (10)$$

$$n + \gamma_1 + \gamma_2 \leq \bar{t} \leq n + 1$$

где:

$$i_n(n+\gamma_1+\gamma_2) = \left( i_n(n+\gamma_1) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \frac{U_c(n+\gamma_1) - 0.5i_n(n+\gamma_1) - e_n}{z_n} \sin \bar{\omega}_2 \gamma_2 \right) e^{-0.5\alpha \gamma_2}$$

Перейдя к решетчатым функциям, путем подстановки в (10) значения  $\bar{t} = n+1$  [3] и решив полученное разностное уравнение с помощью Z-преобразования (дискретного преобразования Лапласа), найдем значение тока в начале периода работы КРИП-ПНТ:

$$i_n(n) = A(\gamma) \frac{1 - B(\gamma)^n}{1 - B(\gamma)} \quad (11)$$

где:

$$A(\gamma) = \frac{e_n}{R_n} + \left[ \frac{e_n}{R_n} + \left( -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \left[ -\frac{\omega_k^2(U_n - U_c(n))}{(r^2 + m^2) T_n p_2} + F_c' e^{\alpha \gamma_1} + (B_c' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_c' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5 \left( -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) - e_n \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_n} \right] e^{-\alpha \gamma_1} e^{-\alpha(1-\gamma_1-\gamma_2)},$$

$$B(\gamma) = \left( F_n'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \left[ F_c'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_c'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_c'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5 \left( F_n'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_n} e^{-\alpha(1-\gamma_1-0.5\gamma_2)}.$$

Установившееся значение тока в начале периода переключения, найдем из выражения (11), подставив в него  $n \rightarrow \infty$ :

$$i_n(n) = i_{\text{нп}}(t_0) = \frac{A(\gamma)}{1 - B(\gamma)}$$

Для нахождения тока в межкоммутационные интервалы времени, воспользуемся модифицированным Z-преобразованием. Для этого подставим в выражения (2), (7), (10)  $\bar{t} = n + \varepsilon$ , где  $\varepsilon = \Delta t / T$  - параметр смещения решетчатой функции. Получим следующие значения тока якоря:

$$i_{n1}(\varepsilon) = I_{11}(\varepsilon) + i_n(n) I_{12}(\varepsilon), \quad 0 \leq \varepsilon \leq \gamma_1 \quad (12)$$

$$i_{n2}(\varepsilon) = (I_{21}(\varepsilon) + i_n(n) I_{22}(\varepsilon)) e^{-0.5\alpha(\varepsilon-\gamma_1)}, \quad \gamma_1 \leq \varepsilon \leq \gamma_1 + \gamma_2 \quad (13)$$

$$i_{n3}(\varepsilon) = -\frac{e_n}{R_n} + (I_{31} + i_n(n) I_{32}) e^{-\alpha(\varepsilon-\gamma_1-\gamma_2)}, \quad \gamma_1 + \gamma_2 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (14)$$

где:

$$I_{11}(\varepsilon) = -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \varepsilon} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \varepsilon + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \varepsilon) e^{\alpha_2 \varepsilon},$$

$$I_{12}(\varepsilon) = F_n'' e^{\alpha \varepsilon} + (B_n'' \sin \bar{\omega}_1 \varepsilon + C_n'' \cos \bar{\omega}_1 \varepsilon) e^{\alpha_2 \varepsilon},$$

$$I_{21}(\varepsilon) = \left( -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) \cos \bar{\omega}_2(\varepsilon - \gamma_1) + \left[ -\frac{\omega_k^2(U_n - U_c(n))}{(r^2 + m^2) T_n p_2} + F_c' e^{\alpha \gamma_1} + (B_c' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_c' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5 \left( -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) - e_n \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2(\varepsilon - \gamma_1)}{z_n},$$

$$I_{22}(\varepsilon) = (F_n'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1}) \cos \bar{\omega}_2(\varepsilon - \gamma_1) + \left[ F_c'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_c'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_c'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5 \left( F_n'' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n'' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n'' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2(\varepsilon - \gamma_1)}{z_n},$$

$$I_{31} = \frac{e_n}{R_n} + \left( -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \left[ -\frac{\omega_k^2(U_n - U_c(n))}{(r^2 + m^2) T_n p_2} + F_c' e^{\alpha \gamma_1} + (B_c' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_c' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5 \left( -\frac{\omega_k^2(U_n - e_n)}{L_n p_2 (r^2 + m^2)} + F_n' e^{\alpha \gamma_1} + (B_n' \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C_n' \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right) - e_n \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_n}$$

$$-0.5 \left[ \frac{\omega_k^2 (U_{II} - e_a)}{L_a p_2 (r^2 + m^2)} + F'_a e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B'_a \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C'_a \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right] - e_a \left] \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_a} \right) e^{-0.5 \alpha_1 \gamma_2},$$

$$I_{32} = \left( (F''_a e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B''_a \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C''_a \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1}) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \right.$$

$$\left. + [F''_c e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B''_c \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C''_c \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - \right.$$

$$\left. - 0.5 (F''_a e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B''_a \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C''_a \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1}) \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_a} \right) e^{-0.5 \alpha_1 \gamma_2}.$$

Максимальное значение тока якоря будет в конце второго интервала работы КРИП-ПНТ, его можно найти, подставив в выражение (13)  $\varepsilon = \gamma_1 + \gamma_2$  и значение установившегося тока якоря  $i_{яв}(t_0)$ :

$$i_{яв} = (I_{21}(\gamma_1 + \gamma_2) + i_{яв}(t_0) I_{22}(\gamma_1 + \gamma_2)) e^{-0.5 \alpha_1 \gamma_2}$$

Минимальное значение тока якоря будет в конце периода работы КРИП-ПНТ (в начале следующего периода), т.е. оно будет равно  $i_{яв}(t_0)$ .

Удвоенная амплитуда пульсаций тока якоря (максимальное отклонение тока от его минимального значения):

$$\Delta i_{я} = i_{яв} - i_{яв}(t_0), \quad (15)$$

Установившееся значение постоянной составляющей тока нагрузки можно найти в результате интегрирования токов на трех коммутационных интервалах, выражения (10), (11), (12):

$$I_{0я} = I_{01} + I_{02} + I_{03}, \quad (16)$$

где:

$$I_{01} = \int_0^{\gamma_1} i_{я1}(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{-\omega_k^2 (U_{II} - e_a)}{L_a p_2 (r^2 + m^2)} \gamma_1 + \frac{F'_a (e^{\alpha_1 \gamma_1} - 1)}{\alpha_1} + \frac{B'_a \bar{\omega}_1 - C'_a \alpha_2}{\alpha_2^2 + \bar{\omega}_1^2} +$$

$$+ \frac{(C'_a \bar{\omega}_1 + B'_a \alpha_2) \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + (C'_a \alpha_2 - B'_a \bar{\omega}_1) \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1}{\alpha_2^2 + \bar{\omega}_1^2} e^{\alpha_2 \gamma_1} +$$

$$+ i_{яв}(n) \left[ \frac{F''_a (e^{\alpha_1 \gamma_1} - 1)}{\alpha_1} + \frac{B''_a \bar{\omega}_1 - C''_a \alpha_2}{\alpha_2^2 + \bar{\omega}_1^2} + \frac{(C''_a \bar{\omega}_1 + B''_a \alpha_2) \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + (C''_a \alpha_2 - B''_a \bar{\omega}_1) \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1}{\alpha_2^2 + \bar{\omega}_1^2} e^{\alpha_2 \gamma_1} \right],$$

$$I_{02} = \int_{\gamma_1}^{\gamma_1 + \gamma_2} i_{я2}(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{A_1(\gamma_1) + 2A_2(\gamma_1) \bar{\omega}_2 + (2A_3(\gamma_1) \bar{\omega}_2 - A_4(\gamma_1)) \sin \bar{\omega}_2 \gamma_2 - (A_4(\gamma_1) \bar{\omega}_2 + 2A_3(\gamma_1) \bar{\omega}_2) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2}{0.5 - 2\bar{\omega}_2^2} e^{-0.5 \alpha_1 \gamma_2} +$$

$$+ i_{яв}(n) \frac{B_1(\gamma_1) + 2B_2(\gamma_1) \bar{\omega}_2 + (2B_3(\gamma_1) \bar{\omega}_2 - B_4(\gamma_1)) \sin \bar{\omega}_2 \gamma_2 - (B_4(\gamma_1) \bar{\omega}_2 + 2B_3(\gamma_1) \bar{\omega}_2) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2}{0.5 - 2\bar{\omega}_2^2} e^{-0.5 \alpha_1 \gamma_2},$$

$$A_1(\gamma_1) = -\frac{\omega_k^2 (U_{II} - e_a)}{L_a p_2 (r^2 + m^2)} + F'_a e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B'_a \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C'_a \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1},$$

$$A_2(\gamma_1) = \left[ -\frac{\omega_k^2 U_{II}}{(r^2 + m^2) T_a p_2} + F'_c e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B'_c \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C'_c \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - \right.$$

$$\left. - 0.5 \left[ \frac{\omega_k^2 (U_{II} - e_a)}{L_a p_2 (r^2 + m^2)} + F'_a e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B'_a \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C'_a \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} \right] - e_a \right] \frac{1}{z_a},$$

$$B_1(\gamma_1) = F''_a e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B''_a \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C''_a \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1},$$

$$B_2(\gamma_1) = \frac{F''_c e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B''_c \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C''_c \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5 (F''_a e^{\alpha_1 \gamma_1} + (B''_a \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + C''_a \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1})}{z_a},$$

$$I_{03} = \int_{\gamma_1 + \gamma_2}^1 i_{я3}(\varepsilon) d\varepsilon = -\frac{e_a}{R_a} (1 - \gamma_1 - \gamma_2) + \frac{I_{31} + i_{яв}(n) I_{32}}{\alpha} (1 - e^{-\alpha(1 - \gamma_1 - \gamma_2)}),$$

На Рис.3 приведены графические зависимости от времени тока якоря, напряжения на конденсаторе контура, тока контура для момента включения КРИП-ПНТ (первый период работы) при следующих параметрах:  $R_a = 0.5 \text{ Ом}$ ,  $L_a = 10 \text{ мкГн}$ ,  $L_k = 1 \text{ мкГн}$ ,  $C_k = 0.01$

$\text{мкФ}$ ,  $T = 1.885 \text{ мкс}$ ,  $U_n = 24 \text{ В}$ ,  $e_a = 0 \text{ В}$ ,  $U_C(n) = 0 \text{ В}$ ,  $i_a(n) = 0 \text{ А}$ . На Рис.4 приведены те же зависимости, но уже для установившегося режима работы КРИП-ПНТ, в этом случае  $e_a = 7 \text{ В}$ ,  $U_C(n) = 0 \text{ В}$ ,  $i_a(n) = 0.8 \text{ А}$

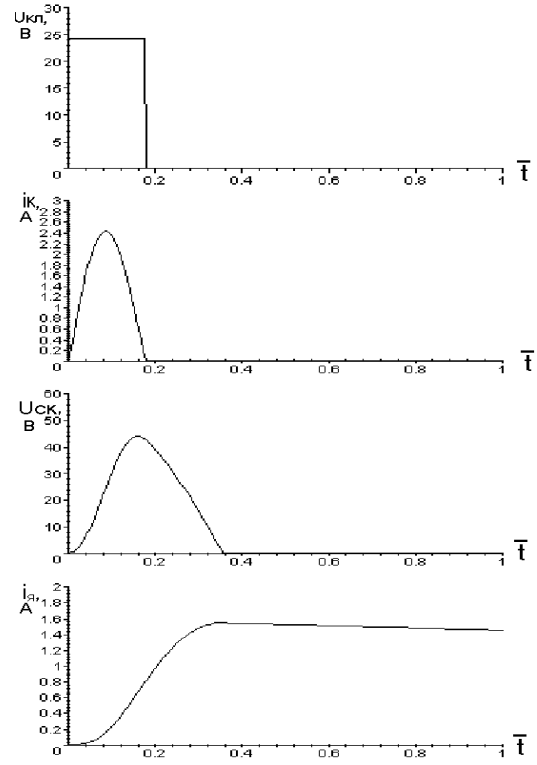


Рис.3

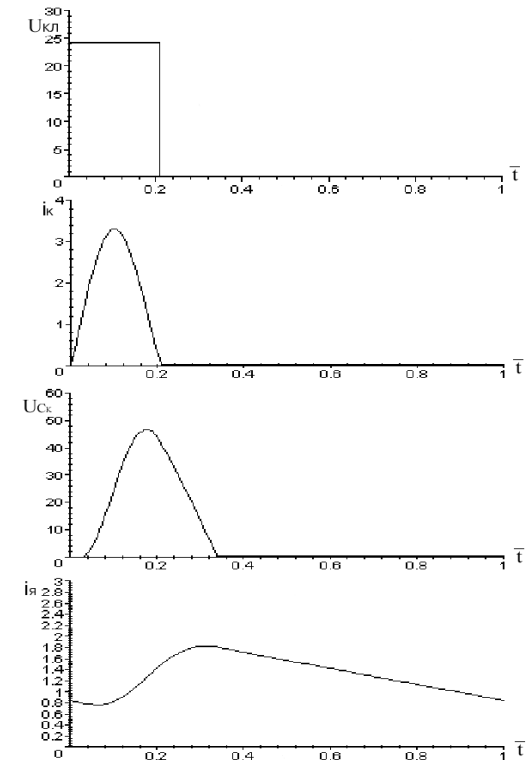


Рис.4

Рис.3 и 4 свидетельствуют о достоверности полученных результатов. Формы напряжений и токов в КРИП-ПНТ с нагрузкой в виде ДПТ и с обычной нагрузкой подобны, но в отличие от статической

нагрузки, при динамической нагрузке возможно изменение величины нагрузки в несколько раз. Ток якоря в нашем случае будет существенно зависеть от противо-э.д.с. якоря, которая в свою очередь зависит от нагрузки. Противо-э.д.с. якоря будет оказывать существенное влияние на длительности периодов работы КРИП-ПНТ. Так на Рис.5 приведены расчетные зависимости относительной длительности первого ( $\gamma_1$ ) и второго ( $\gamma_2$ ) интервалов от противо-э.д.с. двигателя, а также тока якоря в начале периода переключений ( $i_{я}(n)$ ).

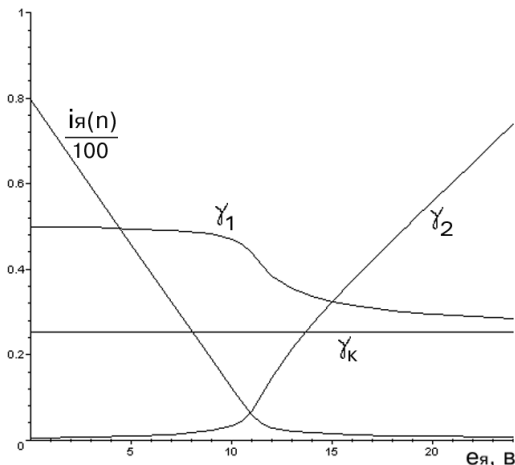


Рис.5

Графики на Рис.5 построены при следующих параметрах:  $R_{я}=0.1 \text{ Ом}$ ,  $L_{я}=200 \text{ мкГн}$ ,  $L_{к}=1 \text{ мкГн}$ ,  $C_{к}=0.01 \text{ мкФ}$ ,  $T=1.257 \text{ мкс}$ ,  $U_n=24 \text{ В}$ ,  $U_c(n)=0 \text{ В}$ ,  $\gamma_k = \frac{\Delta t_1}{T} = \frac{\pi \sqrt{L_k C}}{T} = 0.25$ ,  $\Delta t_1 = 0.314 \text{ мкс}$ .

Как видно из Рис.5, длительность первого и второго интервала существенно зависит от  $e_{я}$ . Особо следует отметить непостоянство первого интервала. Если выключать транзистор при постоянном времени, рассчитанном по (5), где не учитывается влияние цепей

нагрузки на резонансный контур, то выключение будет происходить не при нулевом токе, что приведет к значительным потерям мощности, увеличению излучаемых радиопомех и ухудшению совместимости с питающей сетью. Причем, при снижении  $e_{я}$  до 0, длительность первого интервала увеличивается в два раза, что приведет к выключению силового ключа уже не при нулевом токе, а при максимальном его значении. Вследствие этого возникает необходимость принудительного сохранения режима переключения силового транзистора КРИП при нулевом токе посредством соответствующих схемотехнических решений.

Теоретические результаты, представленные на Рис.5, уточнены посредством электронного моделирования на ЭВМ в пакете MSIM 6.1, а также на физическом макете. Расхождение сравниваемых результатов не превышает единиц процентов.

Исходя из полученных результатов, можно сделать выводы:

1. Полученные выражения для токов и напряжений КРИП-ПНТ нагруженного на ДПТ позволяют рассчитать их значение в переходных и установившихся режимах, рассчитать пульсации тока и скорости, что важно для прецизионного электропривода.
2. Наличие противо-э.д.с. двигателя и ее изменение под действием нагрузки, существенно влияет на время первого интервала, поэтому для сохранения режима переключения силового ключа при нулевом токе предусматривать систему контроля момента прохождения тока контура через ноль и синхронизировать с ним момент выключения силового транзистора.

[1] ТИИЭР. Тематический выпуск. Энергетическая электроника. Под ред. В. А. Лабунцова, 1988, № 4, с. 83-97.

[2] Денисов Ю.А. Стабилизаторы постоянного напряжения с импульсными и квазирезонансными регулирующими элементами: Дисс. кандидата техн.наук: 05.09.12. – Чернигов, ЧТИ, 1998, - 157 с.

[3] Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. -М.: Физматгиз, 1963.-968 с.