

КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СИСТЕМАХ ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

А.И.Денисов, А.С.Ревко

Черниговский государственный технологический университет

Украина, 14027, г. Чернигов, ул. Шевченко, 95, ЧГТУ

Тел. (0462) 94-01-34, E-mail: asr@inel.stu.cn.ua

Annotation – Mechanical properties of a system "zero current switched quasiresonant pulse convertor – direct current motor" is considered in this paper.

Key words – zero current switched quasiresonant pulse convertor, D.C. motor, mechanical properties.

Квазирезонансные импульсные преобразователи, переключаемые при нулевом токе (КРИП-ПНТ) весьма перспективны для систем электропривода с требованием по допустимой нестабильности скорости в пределах одного оборота, измеряемой сотыми – тысячными долями процента. Такие требования, в частности, выдвигаются к электроприводам аппаратов точной магнитной записи (АТМЗ), которые, обычно, выполняются на основе вентильных двигателей (ВД), работающих либо в режиме машины постоянного тока, либо же в синхронном режиме. При этом для регулирования и стабилизации скорости вращения используются два способа – фазовый или амплитудный. Амплитудный метод связан с регулированием напряжения питания ВД. Эту функцию наиболее эффективно реализуют КРИП-ПНТ. Хотя их рабочая частота измеряется единицами МГц, однако, динамические потери за счет наличия резонансного контура и режима переключения при нуле тока, значительно ниже аналогичных потерь в ШИП(е). Для прецизионных электроприводов очень важно иметь низкие пульсации напряжения питания, минимальный уровень помех и высокие удельные характеристики, что можно достичь в результате применения КРИП-ПНТ.

КРИП-ПНТ, как известно, работает в широком диапазоне частот. На низких частотах пульсации скорости возрастают. Важно определить уровень этих пульсаций, позволяющих оценить точность стабилизации скорости и жесткость механических характеристик электропривода в разомкнутой и в замкнутой системах. В замкнутой системе жесткая механическая характеристика позволяет обеспечить желаемую стабильность скорости с меньшими значениями коэффициента усиления, что расширяет запас устойчивости. На выходе КРИП включается резонансный контур, поэтому, по сравнению с ШИП, механическая характеристика двигателя постоянного тока (ДПТ) может быть более мягкой, что потребует увеличения коэффициента усиления системы для достижения необходимого качества стабилизации скорости.

Механические характеристики электродвигателя постоянного тока, питание которого осуществляется от источника постоянного напряжения, имеют вид прямых, параллельных оси абсцисс. Их наклон зависит от нагрузки, а взаимное расположение – от величины напряжения питания. В импульсном режиме работы характер механических характеристик может измениться. Особенно этого следует ожидать при питании ДПТ от КРИП-ПНТ, у которого помимо ключа

имеется и резонансный контур. В [1] показано, что на периоде работы КРИП-ПНТ имеется три коммутационных интервала, в пределах которых ток якоря ДПТ принимает следующие значения:

$$\bar{i}_y(\varepsilon) = \begin{cases} \bar{i}_{y1}(\varepsilon) = \bar{I}_{11}(\varepsilon) + \bar{i}_y(0)I_{12}(\varepsilon), & 0 \leq \varepsilon \leq \gamma_1 \\ \bar{i}_{y2}(\varepsilon) = (\bar{I}_{21}(\varepsilon) + \bar{i}_y(0)I_{22}(\varepsilon))e^{-0.5\alpha(\varepsilon-\gamma_1)} & \gamma_1 \leq \varepsilon \leq \gamma_1 + \gamma_2 \\ \bar{i}_{y3}(\varepsilon) = -\bar{e}_y + (\bar{I}_{31} + \bar{i}_y(0)I_{32})e^{-\alpha(\varepsilon-\gamma_1-\gamma_2)} & \gamma_1 + \gamma_2 \leq \varepsilon \leq 1 \end{cases}, \quad (1)$$

где $\bar{i}_y(\varepsilon) = i_y(\varepsilon)/I_{\beta C}$ – относительный ток якоря;

$\bar{e}_y = e_y/U_{\Pi}$ – относительное значение е.д.с. якоря;

$I_{KC} = \frac{U_I}{R_{\beta}}$ – ток короткого замыкания якоря;

$$\bar{I}_{11}(\varepsilon) = -\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \varepsilon} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \varepsilon + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \varepsilon) e^{\alpha_y \varepsilon};$$

$$\bar{I}_{21}(\varepsilon) = \left[-\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} \right] \cos \bar{\omega}_2(\varepsilon-\gamma_1) + \left[-\frac{\omega_k^2 R_{\beta}}{(r^2+m^2)T_y p_2} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} - 0.5R_{\beta} \left(-\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} \right) - R_{\beta} \bar{e}_y \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2(\varepsilon-\gamma_1)}{z_1};$$

$$\bar{I}_{31} = \bar{e}_y + \left[\left(-\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} \right) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \left[-\frac{\omega_k^2 R_{\beta}}{(r^2+m^2)T_y p_2} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} - 0.5R_{\beta} \left(-\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} \right) - R_{\beta} \bar{e}_y \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_1} \right] e^{-0.5\alpha \gamma_2};$$

$$\bar{B}'_y = \frac{(r^2-m^2-rp_2)\omega_k^2}{mT_y z_1(r^2+m^2)}(1-\bar{e}_y) - \frac{(r^2+m^2-rp_2)}{T_y m z_1} \bar{e}_y;$$

$$\bar{C}'_y = \frac{(p_2-2r)\omega_k^2}{T_y z_1(r^2+m^2)}(1-\bar{e}_y) + \frac{p_2}{T_y z_1} \bar{e}_y; \quad \bar{F}'_y = \frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y) - p_2 \bar{e}_y}{T_y p_2 z_1};$$

$$\bar{F}'_c = \frac{(1+p_2 T_y)R_y \omega_k^2}{p_2 T_y z_1} + \frac{R_y \omega_{ka}^2}{z_1} \bar{e}_y;$$

$$\bar{B}'_c = \left(\frac{r^2-m^2-rp_2}{T_y(r^2+m^2)} + r - p_2 \right) \frac{R_y \omega_k^2}{m z_1} + \frac{r-p_2}{m z_1} R_y \omega_{ka}^2 \bar{e}_y;$$

$$\bar{C}'_c = \frac{(p_2-2r-(r^2+m^2)T_y)R_y \omega_k^2}{z_1 T_y(r^2+m^2)} - \frac{R_y \omega_{ka}^2}{z_1} \bar{e}_y; \quad \bar{i}_y(0) = \frac{\bar{A}(\gamma)}{1-B(\gamma)};$$

$$\bar{A}(\gamma) = -\bar{e}_y + \left[\bar{e}_y + \left[\left(-\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} \right) \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \left[-\frac{\omega_k^2 R_{\beta}}{(r^2+m^2)T_y p_2} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} - 0.5R_{\beta} \left(-\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}'_y e^{\alpha_y \gamma_1} + (\bar{B}'_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}'_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_y \gamma_1} \right) - R_{\beta} \bar{e}_y \right] \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_1} \right] e^{-0.5\alpha \gamma_2} \right];$$

$$-0.5R_y \left(-\frac{\omega_k^2(1-\bar{a}_i)}{T_y p_2(r^2+m^2)} + \bar{F}_y e^{\alpha_1 \gamma_1} + (\bar{B}_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - \bar{e}_y \right) \frac{\sin \bar{\omega}_2 \gamma_2}{z_y} \left] e^{-0.5\alpha_2 \gamma_2} \right] e^{-\alpha_1(1-\gamma_1-\gamma_2)};$$

$$\omega_k = \frac{1}{\sqrt{L_k C}}; \omega_{ky} = \frac{1}{\sqrt{L_y C}}; T_y = \frac{L_y}{R_y}; p_2 = -\left(-D + \frac{1}{3T_y} \right);$$

$$r = -\left(\frac{1}{2}D + \frac{1}{3T_y} \right); m = \frac{\sqrt{3}}{2}D'; z_1 = (p_2 - r)^2 + m^2 = (r - p_2)^2 + m^2;$$

$$D = \frac{1}{6}A - \frac{2\left(\omega_{ky}^2 + \omega_k^2 - \frac{1}{3T_y^2}\right)}{A}; D' = \frac{1}{6}A + \frac{2\left(\omega_{ky}^2 + \omega_k^2 - \frac{1}{3T_y^2}\right)}{A};$$

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

$$k = \frac{L_k}{L_y}; \alpha_1 = T p_2; \alpha_2 = T r; \bar{\omega}_1 = \omega_1 T; \omega_1 = m; \gamma_1 = \frac{\Delta t_1}{T};$$

$$\omega_2 = \sqrt{\omega_{ka}^2 - \frac{1}{4T_y^2}}; z_y = L_y \omega_2 = \sqrt{\frac{L_y}{C} - \frac{R_y^2}{4}}; \alpha = \frac{T}{T_y};$$

$$\bar{\omega}_2 = \omega_2 T; \gamma_2 = \frac{\Delta t_2}{T}; \varepsilon = \Delta t / T;$$

$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ – интервалы работы ключа КРИП;

$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$ – период работы ключа КРИП.

Среднее значение тока (в относительных единицах):

$$\bar{I}_y = \int_0^1 \bar{i}_y(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^{\gamma_1} \bar{i}_{y1}(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{\gamma_1}^{\gamma_1+\gamma_2} \bar{i}_{y2}(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{\gamma_1+\gamma_2}^1 \bar{i}_{y3}(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (2)$$

где

$$\int_0^{\gamma_1} \bar{i}_{y1}(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\bar{F}_y + \bar{i}_y(0)F_y''}{\alpha_1} (e^{\alpha_1 \gamma_1} - 1) + a\alpha_1 \gamma_1 + \frac{(\bar{B}_y + \bar{i}_y(0)B_y'')\alpha_2 + (\bar{C}_y + \bar{i}_y(0)C_y'')\bar{\omega}_1}{\alpha_2^2 + \bar{\omega}_1^2} \bar{\omega}_1 +$$

$$\left(\frac{(\bar{B}_y + \bar{i}_y(0)B_y'')\alpha_2 + (\bar{C}_y + \bar{i}_y(0)C_y'')\bar{\omega}_1}{\alpha_2^2 + \bar{\omega}_1^2} \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \frac{(\bar{C}_y + \bar{i}_y(0)C_y'')\alpha_2 - (\bar{B}_y + \bar{i}_y(0)B_y'')\bar{\omega}_1}{\alpha_2^2 + \bar{\omega}_1^2} \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1 \right) e^{\alpha_2 \gamma_1},$$

$$\int_{\gamma_1}^{\gamma_1+\gamma_2} \bar{i}_{y2}(\varepsilon) d\varepsilon = 2 \frac{(AA + \bar{i}_y(0)BB)\alpha - 2(AA + \bar{i}_y(0)BA)\bar{\omega}_2}{\alpha^2 + 4\bar{\omega}_2^2} -$$

$$- 2 \left(\frac{(AB + \bar{i}_y(0)BB)\alpha - 2(AA + \bar{i}_y(0)BA)\bar{\omega}_2}{\alpha^2 + 4\bar{\omega}_2^2} \sin \bar{\omega}_2 \gamma_2 + \frac{(AA + \bar{i}_y(0)BA)\alpha + 2(AB + \bar{i}_y(0)BB)\bar{\omega}_2}{\alpha^2 + 4\bar{\omega}_2^2} \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2 \right) e^{-0.5\alpha_2 \gamma_2},$$

$$\int_{\gamma_1+\gamma_2}^1 \bar{i}_{y3}(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\bar{i}_y(0)I_{32}}{\alpha} + \left(\frac{1}{\alpha} + \gamma_1 + \gamma_2 - 1 \right) \bar{e}_y + \frac{AB \sin \bar{\omega}_2 \gamma_2 + AA \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2}{\alpha} e^{-0.5\alpha_2 \gamma_2} -$$

$$- \frac{1}{\alpha} \left((AB \sin \bar{\omega}_2 \gamma_2 + AA \cos \bar{\omega}_2 \gamma_2) e^{-0.5\alpha_2 \gamma_2} + \bar{e}_y + \bar{i}_y(0)I_{32} \right) e^{\alpha(\gamma_1+\gamma_2-1)},$$

$$aa = -\frac{\omega_k^2(1-\bar{e}_y)}{T_y p_2(r^2+m^2)},$$

$$AA = aa + \bar{F}_y e^{\alpha_1 \gamma_1} + (\bar{B}_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1},$$

$$AB = \frac{1}{z_y} \left(-\frac{\omega_k^2 R_y}{(r^2+m^2)T_x p_2} + \bar{F}_y e^{\alpha_1 \gamma_1} + (\bar{B}_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5R_y AA - R_y \bar{e}_y \right),$$

$$BA = F_y'' e^{\alpha_1 \gamma_1} + (\bar{B}_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1},$$

$$BB = \frac{F_y'' e^{\alpha_1 \gamma_1} + (\bar{B}_y \sin \bar{\omega}_1 \gamma_1 + \bar{C}_y \cos \bar{\omega}_1 \gamma_1) e^{\alpha_2 \gamma_1} - 0.5BA}{z_y}$$

Если в выражении (2) учесть, что относительная скорость $\bar{\Omega} = \Omega/\Omega_0 = e_\beta / U_i = \bar{e}_\beta$, а момент $\bar{M} = M/M_{K\phi} = I_y / I_{\dot{E}C} = \bar{I}_y$, то решив полученное уравнение относительно $\bar{\Omega}$, можно найти выражение импульсной механической характеристики (3), семей-

ство которых представлено на рис.1 для различной частоты работы КРИП.

$$\bar{\Omega} = f(\bar{M}). \quad (3)$$

При их построении не учтена зависимость длительности первого и второго коммутационных интервалов ($\Delta t_1, \Delta t_2$) от величины противо-э.д.с. Поэтому полученные импульсные механические характеристики такие же, как у обычного ДПТ с ШИП [2] (прямые линии с пересечением в одной точке), однако, они мягче, поскольку в силовой цепи КРИП присутствует резонансный контур. Характеристики, рис.1, построены для следующих значений параметров: $R_y = 1 \text{ Ом}$, $L_y = 20 \text{ мкГн}$, $L_k = 0.25 \text{ мкГн}$, $C_k = 0.039 \text{ мкФ}$, $U_{II} = 24 \text{ В}$, $e_y = 17 \text{ В}$, $t_1 = 0.36 \text{ мкс}$, $t_2 = 0.7 \text{ мкс}$, $\tau_k = 0.31 \text{ мкс}$.

Как видно из рис.1, с уменьшением частоты ра-

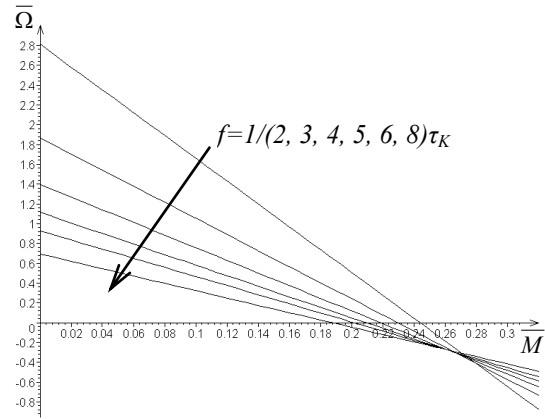


Рис.1. Импульсные механические характеристики ДПТ, противо-э.д.с двигателя постоянна

боты КРИП, что эквивалентно снижению скважности импульсов, жесткость механических характеристик увеличивается. Это можно объяснить тем, что с уменьшением частоты, увеличивается длительность третьего интервала, на котором двигатель закорочен открытым обратным диодом, что приводит к изменению электрической постоянной времени цепи, так как на первом и втором интервалах в цепь якоря включен ещё и резонансный контур. На третьем интервале двигатель закорочен обратным диодом, в этом случае, постоянная времени цепи якоря будет максимальной. В экспериментальных характеристиках отмеченная особенность более заметна, так как на величине постоянной времени цепи якоря на высокой частоте сказываются сопротивление соединительных проводов и параметры активных и пассивных компонентов силовой цепи КРИП.

Теоретические импульсные механические характеристики, приведенные на рис.1, отличаются от экспериментальных, т.к. в процессе анализа трудно учесть зависимость длительности коммутационных интервалов КРИП от нагрузки, от частоты вращения, и от противо-э.д.с. двигателя.

Механические характеристики ДПТ с учетом его противо-э.д.с. построены численным методом с учетом [1] и выражения (3) при следующих значениях параметров: $R_y = 1 \text{ Ом}$, $L_y = 20 \text{ мкГн}$, $L_k = 0.25 \text{ мкГн}$, $C_k = 0.039 \text{ мкФ}$, $\tau_k = 0.31 \text{ мкс}$.

Как видно из рис.2, механические характеристики с учетом противо-э.д.с нелинейны. Нелинейность

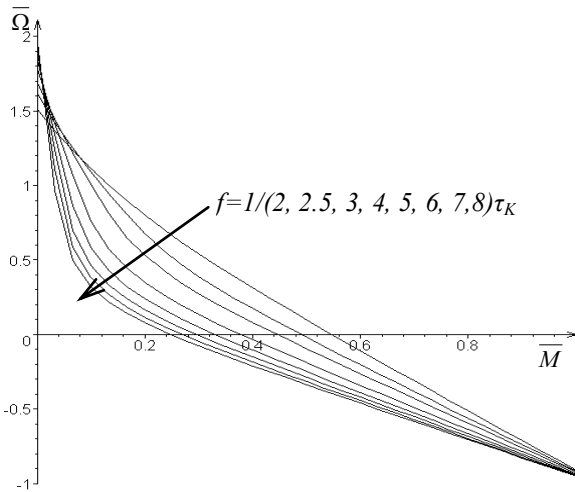


Рис.2. Импульсные механические характеристики с учетом влияния противо-э.д.с.

связана со спецификой КРИП, как звена системы, что проявляется, в частности, в непостоянстве времени первого и второго интервалов работы КРИП при изменении нагрузки. Нелинейность особенно заметна при малых нагрузках (меньше 0.2). В этом случае возрастает длительность второго интервала, и, как следствие, увеличивается среднее напряжение на выходе преобразователя. В режимах, близких к холостому ходу скорость ДПТ резко увеличивается как у двигателя с последовательным возбуждением. Если же относительный момент нагрузки больше 0.2, то механические характеристики, практически, линейны. Причём, чем меньше частота работы КРИП, тем шире линейный участок. Для механических характеристик с учетом влияния противо-э.д.с. двигателя характерно увеличение жесткости с понижением частоты работы КРИП.

Характеристики, рис.1 и 2, отличны друг от друга при изменении частоты, что связано с тем, что при ее увеличении до некоторого значения, конденсатор контура не будет успевать разряжаться до нуля к началу следующего периода, вследствие чего нарушается обычный порядок работы КРИП.

На рис.3 представлены теоретические и экспериментальные механические характеристики ДПТ с однократным КРИП. При их построении теоретические характеристики были смещены влево на величину относительного статического момента. За номинальную частоту вращения взята скорость двигателя на холостом ходу.

Из рис. 3 видно, что характер расчётных и экспериментальных характеристик совпадает. Заметное расхождение этих характеристик при минимальном моменте нагрузки и максимальной частоте работы КРИП объясняется принятыми допущениями при составлении математической модели системы КРИП – ДПТ.

На рис.4 представлены экспериментальные механические характеристики ДПТ с двухтактным КРИП. Для механических характеристик привода с двухтактным преобразователем характерна большая жесткость и большая зона линейности, по сравнению с однократной схемой. Эта особенность объясняется тем, что в двухтактной схеме электромагнитная энергия, накопленная в нагрузке передается в источник пита-

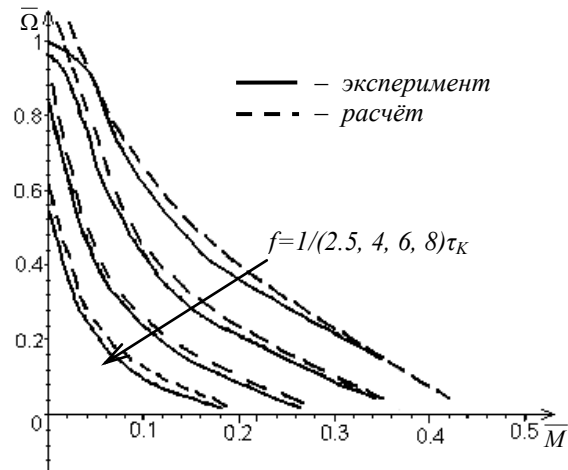


Рис.3. Импульсные механические характеристики ДПТ с однократным КРИП

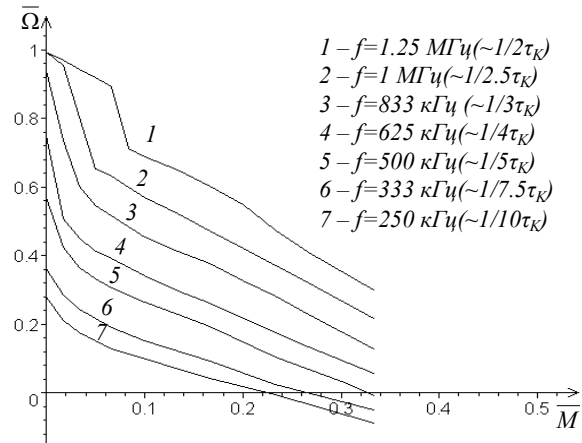


Рис.4. Экспериментальные механические характеристики ДПТ с двухтактным КРИП

ния. Существенная нелинейность первой и второй характеристик при малых нагрузках обусловлена ростом напряжения на конденсаторе контура вследствие увеличения его добротности.

Сравнивая механические характеристики привода с однократным и двухтактным КРИП можно заключить, что двухтактный преобразователь предпочтительнее для использования в АТМЗ, так как в этом случае характеристики ДПТ жестче и линейнее, чем с однократным преобразователем. Это позволит уменьшить необходимый динамический диапазон системы в процессе управления для стабилизации скорости.

В прецизионных электроприводах с импульсными преобразователями необходимо оценивать величину пульсаций скорости при проектировании конкретных устройств.

Для определения уровня пульсаций найдем средние значения скорости на отдельных коммутационных интервалах:

$$\bar{\Omega}_1 = \frac{1}{T_m} \int (\bar{i}_{\alpha 1}(\varepsilon) - \bar{I}_\alpha) d\varepsilon + C_1; \quad 0 \leq \varepsilon \leq \gamma_1; \quad (4)$$

$$\bar{\Omega}_2 = \frac{1}{T_m} \int (\bar{i}_{\alpha 2}(\varepsilon) - \bar{I}_\alpha) d\varepsilon + C_2; \quad \gamma_1 \leq \varepsilon \leq \gamma_1 + \gamma_2; \quad (5)$$

$$\bar{\Omega}_3 = \frac{1}{T_m} \int (\bar{i}_{\alpha 3}(\varepsilon) - \bar{I}_\alpha) d\varepsilon + C_3; \quad \gamma_1 + \gamma_2 \leq \varepsilon \leq 1; \quad (6)$$

где

$$\bar{O}_i = \frac{JR_\beta}{c^2 T} - \text{относительная электромеханическая}$$

постоянная привода;

J – момент инерции;

c – постоянная двигателя;

$C1, C2$ и $C3$ – константы интегрирования.

Проинтегрировав эти выражения и решив их относительно $\bar{\Omega}$, с учетом того, что относительная скорость $\bar{\Omega} = \Omega/\Omega_0 = e_\beta / U_I = \bar{e}_\beta$, а момент: $\bar{M} = M/M_{KC} = I_y / I_{\beta C} = \bar{I}_y$, получим выражения для скорости на трёх интервалах работы КРИП.

Экстремумы скорости достигаются в моменты, когда $\bar{i}_y(\varepsilon) = \bar{I}_y$. Максимум достигается на втором или третьем интервале работы КРИП, минимум – на первом. Для нахождения моментов максимума и минимума скорости необходимо найти экстремумы выражений (4) – (6). К сожалению, из-за нелинейного характера этих зависимостей, аналитически определить величину пульсаций скорости не удастся, поэтому пульсации были рассчитаны численными методами; результаты представлены на рис.5 – 13. Константы интегрирования C_1, C_2 и C_3 выбирались из условия, что скорость ДПТ в начале периода работы КРИП равняется нулю (из-за этого на характеристиках присутствуют участки с отрицательной скоростью), поскольку нас интересует амплитуда пульсаций скорости.

На рис.5 и 6 приведены кривые пульсаций мгновенной скорости ДПТ за период работы ключа для однотактного и двухтактного КРИП при различной частоте работы преобразователя. Эти кривые получены при следующих значениях параметров: $T_M = 10^{-7} T$, $U_{II} = 24B$, $R_\beta = 1 \text{ Ом}$, $L_\beta = 20 \text{ мкГн}$, $L_K = 0.25 \text{ мкГн}$, $C_K = 0.039 \text{ мкФ}$, $\tau_K = 0.31 \text{ мкс}$, $e_\beta = 5B$.

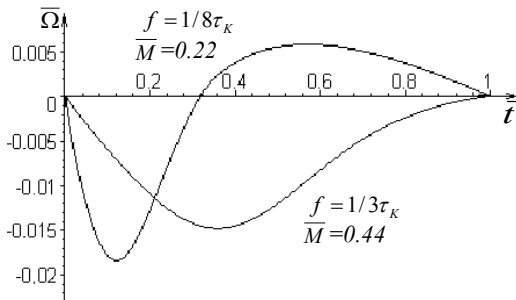


Рис.5. Пульсации скорости ДПТ с одно- тактным КРИП

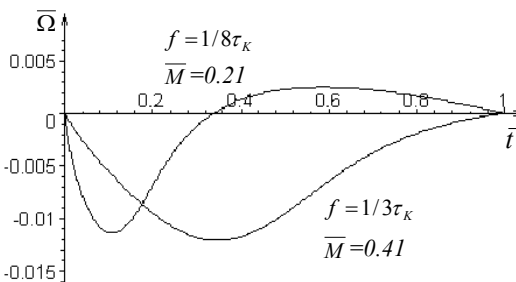


Рис.6. Пульсации скорости ДПТ с двух- тактным КРИП

Из рис.5 и 6 можно видеть, что при изменении частоты работы преобразователя форма пульсаций

скорости остается постоянной, изменяется только длительность положительной полуволны пульсаций скорости и ее амплитуда. При максимальной частоте положительная полуволна отсутствует.

Очевидно, что форма пульсаций не зависит от вида преобразователя (однотактный или двухтактный), у однотактного преобразователя амплитуда пульсаций больше.

На рис.7 приведены расчетные зависимости для момента ДПТ с однотактным (кривые 1 – 3) и двух- тактным (кривая 4) КРИП, где: f_K – собственная частота резонансного контура, f – частота коммутации КРИП.

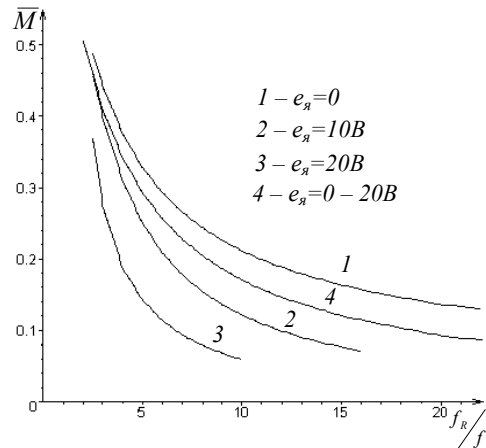


Рис.7. Зависимость момента ДПТ от частоты коммутации КРИП

На рис.8 представлены расчётные зависимости пульсаций скорости ДПТ для однотактного (кривые 1 – 3), и для двухтактного (кривая 4) преобразователей. Кривые построены для фиксированных значений противо-э.д.с. и относительных скоростей.

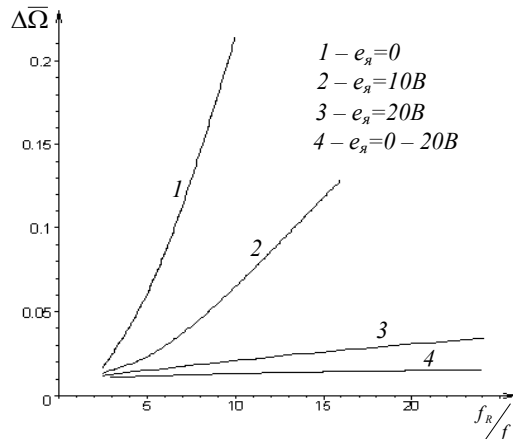


Рис.8. Зависимость пульсаций скорости ДПТ от частоты коммутации КРИП

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для прецизионного электропривода предпочтительнее использовать двухтактный КРИП.

[1] Денисов Ю. А., Ревко А. С.. Анализ электромагнитных процессов в системе квазирезонансный импульсный преобразователь, переключаемый при нулевом токе – двигатель постоянного тока. //Технічна електродинаміка, тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 4. Київ, 2000, С. 29 – 33.

[2] Трахтенберг Р.М. Импульсные астатические си-

стемы электропривода с дискретным управлением. –
М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с., ил.