

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ В РЕЖИМЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ТОКОВ

RESEARCH OF STEADY FORCED OSCILLATIONS IN A DIRECT CURRENT ELECTRIC DRIVE WITH A THYRISTOR CONVERTER IN THE CONTINUOUS CURRENTS MODE

Добробаба Юрий Петрович
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yuriy Petrovitch
Cand.Tech.Sci., professor

Шевченко Жанна Ивановна
к.т.н., доцент

Shevchenko Zhanna Ivanovna
Cand.Tech.Sci., associate professor

Коновалов Федор Вячеславович
студент

Konovalov Fedor Vyacheslavovich
student

Хорцев Анатолий Леонидович
студент
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Khortsev Anatoliy Leonidovich
student
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

В статье получено математическое обеспечение, позволяющее определить размахи отклонений тока якорной цепи электродвигателя и отклонений угловой скорости электропривода постоянного тока с тиристорным преобразователем в режиме непрерывных токов

In this article, the software that allows to determine the ranges of deviations of a motor anchor chain current and angular velocity deviations of a DC electric drive with a thyristor converter in the continuous currents mode has been presented

Ключевые слова: УСТАНОВИВШИЕСЯ КОЛЕБАНИЯ, РАЗМАХ ОТКЛОНЕНИЙ, РЕЖИМ НЕПРЕРЫВНЫХ ТОКОВ

Keywords: STEADY OSCILLATIONS, RANGE OF DEVIATIONS, UNINTERRUPTED CURRENT MODE

В регулируемых электроприводах постоянного тока наиболее широкое применение нашли двухтактные трехфазные мостовые тиристорные преобразователи.

Математическая модель силовой части электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения имеет вид [1, 2]:

$$U(t) = C_e w(t) + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}(t) + L_{\text{я}} \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt};$$

$$C_M I_{\text{я}}(t) = M_c + J \cdot \frac{dw}{dt}(t), \tag{1}$$

- где U – напряжение, подаваемое на якорную цепь двигателя, B ;
- ω – угловая скорость электропривода, $\frac{рад}{с}$;
- $I_{я}$ – ток якорной цепи электродвигателя, A ;
- M_c – момент сопротивления электропривода, $H \cdot м$;
- C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью электропривода и ЭДС двигателя, $\frac{B \cdot с}{рад}$;
- $R_{я}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, $Ом$;
- $L_{я}$ – индуктивность якорной цепи двигателя, $Гн$;
- C_m – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, $B \cdot с$;
- J – момент инерции электропривода, $кг \cdot м^2$.

На выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя на интервале $t_B \leq t \leq (t_B + t_p)$ формируется напряжение:

$$U(t) = U_M \cdot \sin \left[\Omega \cdot (t - t_B) + \frac{p}{3} + a \right]; \quad (2)$$

где t_B – время включения тиристора, $с$;

t_p – время работы тиристора, $с$;

α – угол управления, $рад$;

Ω – угловая частота, $\frac{рад}{с}$.

При этом в системе электропривода в квазиустановившемся режиме развиваются вынужденные колебания. В зависимости от величины момента сопротивления электропривода в системе имеют место два режима: режим непрерывного тока и режим прерывистого тока якорной цепи электродвигателя.

Цель работы – разработка математического обеспечения и определение зависимостей размахов отклонений тока якорной цепи $\Delta I_{\text{я}}$ и отклонений угловой скорости электропривода $\Delta \omega$ от угла управления α в электроприводе постоянного тока с тиристорным преобразователем в режиме неперывного тока.

Математическую модель силовой части электропривода постоянного тока с тиристорным преобразователем целесообразно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \frac{d^2 w}{dt^2}(t) + \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \frac{dw}{dt}(t) + w(t) = \\ = \frac{U_M}{C_e} \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \cdot \sin \Omega \cdot (t - t_B) + \\ + \frac{U_M}{C_e} \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) \cdot \cos \Omega \cdot (t - t_B) - \frac{R_{\text{я}}M_c}{C_e C_M}. \end{aligned} \quad (3)$$

При $\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} > 4 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ характеристическое уравнение системы предста-

вимо в виде:

$$T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) \cdot p + 1 = 0, \quad (4)$$

где $T_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} + \sqrt{\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \left(\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} - 4 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \right)} \right];$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} - \sqrt{\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \left(\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} - 4 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \right)} \right].$$

При $\frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} < 4 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ характеристическое уравнение системы предста-

вимо в виде:

$$T^2 p^2 + 2\chi T p + 1 = 0, \quad (5)$$

где $T = \sqrt{\frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M}};$

$$x = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} \cdot \frac{R_{\text{я}} J}{C_{\text{e}} C_{\text{м}}}}$$

В данной работе ограничимся рассмотрением режима непрерывных токов в системах электроприводов, для которых справедливо условие:

$$\frac{R_{\text{я}} J}{C_{\text{e}} C_{\text{м}}} > 4 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$$

Для координат таких электроприводов в режиме непрерывного тока якорной цепи двигателя на интервале времени $t_{\text{в}} \leq t \leq (t_{\text{в}} + t_{\text{п}})$ справедливы зависимости:

$$\begin{aligned} w(t) = & \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \left[-\frac{1}{T_1^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{e}}} \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + \frac{T_1 \Omega}{T_1^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{e}}} \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) + \right. \\ & \left. + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_{\text{e}} C_{\text{м}}} + w_{\text{нач}} + T_2 \cdot w_{\text{нач}}^{(1)} \right] \cdot e^{-\frac{t-t_{\text{в}}}{T_1}} + \\ & + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \left[\frac{1}{T_2^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{e}}} \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - \right. \\ & \left. - \frac{T_2 \Omega}{T_2^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{e}}} \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_{\text{e}} C_{\text{м}}} - w_{\text{нач}} - T_1 \cdot w_{\text{нач}}^{(1)} \right] \cdot e^{-\frac{t-t_{\text{в}}}{T_2}} + \\ & + \frac{1}{(T_1^2 \Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2 \Omega^2 + 1)} \cdot \left[(T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + \right. \\ & \left. + (1 - T_1 T_2 \Omega^2) \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{e}}} \cdot \sin \Omega \cdot (t - t_{\text{в}}) + \\ & + \frac{1}{(T_1^2 \Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2 \Omega^2 + 1)} \cdot \left[(1 - T_1 T_2 \Omega^2) \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - \right. \\ & \left. - (T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{e}}} \cdot \cos \Omega \cdot (t - t_{\text{в}}) - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_{\text{e}} C_{\text{м}}}; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w^{(1)}(t) = & -\frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \left[-\frac{1}{T_1^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + \right. \\
 & + \frac{T_1 \Omega}{T_1^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_e C_M} + w_{\text{нач}} + \\
 & \left. + T_2 \cdot w_{\text{нач}}^{(1)} \right] \cdot e^{-\frac{t-t_{\text{с}}}{T_1}} - \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \left[\frac{1}{T_2^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - \right. \\
 & - \frac{T_2 \Omega}{T_2^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_e C_M} - w_{\text{нач}} - T_1 \cdot w_{\text{нач}}^{(1)} \left. \right] \cdot e^{-\frac{t-t_{\text{б}}}{T_2}} + \\
 & + \frac{\Omega}{(T_1^2 \Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2 \Omega^2 + 1)} \cdot \left[(T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + \right. \\
 & \left. + (1 - T_1 T_2 \Omega^2) \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \cos \Omega \cdot (t - t_{\text{б}}) - \\
 & - \frac{\Omega}{(T_1^2 \Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2 \Omega^2 + 1)} \cdot \left[(1 - T_1 T_2 \Omega^2) \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - \right. \\
 & \left. - (T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \sin \Omega \cdot (t - t_{\text{б}}); \tag{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{я}}(t) = & \frac{M_{\text{с}}}{C_M} - \frac{J}{C_M} \cdot \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \left[-\frac{1}{T_1^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + \right. \\
 & + \frac{T_1 \Omega}{T_1^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_e C_M} + w_{\text{нач}} + T_2 \cdot w_{\text{нач}}^{(1)} \left. \right] \cdot e^{-\frac{t-t_{\text{б}}}{T_1}} - \\
 & - \frac{J}{C_M} \cdot \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \left[\frac{1}{T_2^2 \Omega^2 + 1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left. -\frac{T_2\Omega}{T_2^2\Omega^2+1} \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \cos\left(\frac{p}{3}+a\right) - \frac{R_я M_c}{C_e C_M} - w_{нач} - T_1 \cdot w_{нач}^{(1)} \right] \cdot e^{-\frac{t-t_B}{T_2}} + \\
 & + \frac{J}{C_M} \cdot \frac{\Omega}{(T_1^2\Omega^2+1) \cdot (T_2^2\Omega^2+1)} \cdot \left[(T_1+T_2) \cdot \Omega \cdot \sin\left(\frac{p}{3}+a\right) + \right. \\
 & \left. + (1-T_1T_2\Omega^2) \cdot \cos\left(\frac{p}{3}+a\right) \right] \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \cos\Omega \cdot (t-t_B) - \\
 & - \frac{J}{C_M} \cdot \frac{\Omega}{(T_1^2\Omega^2+1) \cdot (T_2^2\Omega^2+1)} \cdot \left[(1-T_1T_2\Omega^2) \cdot \sin\left(\frac{p}{3}+a\right) - \right. \\
 & \left. - (T_1+T_2) \cdot \Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3}+a\right) \right] \cdot \frac{U_M}{C_e} \cdot \sin\Omega \cdot (t-t_B). \tag{8}
 \end{aligned}$$

Начальные значения угловой скорости $w_{нач}$ и первой производной угловой скорости $w_{нач}^{(1)}$ определяются по формулам:

$$w_{нач} = \frac{A_1 C_2 + A_2 C_1}{B_1 C_2 + B_2 C_1} \cdot \frac{U_M}{C_e} - \frac{R_я M_c}{C_e C_M};$$

$$w_{нач}^{(1)} = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{B_1 C_2 + B_2 C_1} \cdot \frac{U_M}{C_e},$$

где

$$\begin{aligned}
 A_1 = & \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \frac{1}{T_1^2\Omega^2 + 1} \cdot \left[-\sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + T_1\Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot e^{-\frac{1}{3} \cdot \frac{p}{T_1\Omega}} + \\
 & + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{1}{T_2^2\Omega^2 + 1} \cdot \left[\sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - T_2\Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot e^{-\frac{1}{3} \cdot \frac{p}{T_2\Omega}} + \\
 & + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{(T_1^2\Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2\Omega^2 + 1)} \cdot \left[(T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + \right. \\
 & \left. + (1 - T_1T_2\Omega^2) \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{(T_1^2\Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2\Omega^2 + 1)} \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left[(1 - T_1 T_2 \Omega^2) \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - (T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right]; \\ B_1 &= 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_1 \Omega}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_2 \Omega}}; \\ C_1 &= \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \left[e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_1 \Omega}} - e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_2 \Omega}} \right]; \\ A_2 &= -\frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \frac{1}{T_1^2 \Omega^2 + 1} \cdot \left[-\sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + T_1 \Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_1 \Omega}} - \\ & - \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \frac{1}{T_2^2 \Omega^2 + 1} \cdot \left[\sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - T_2 \Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] \cdot e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_2 \Omega}} + \\ & + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Omega}{(T_1^2 \Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2 \Omega^2 + 1)} \cdot \left[(T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) + \right. \\ & \left. + (1 - T_1 T_2 \Omega^2) \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right] - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\Omega}{(T_1^2 \Omega^2 + 1) \cdot (T_2^2 \Omega^2 + 1)} \times \\ & \times \left[(1 - T_1 T_2 \Omega^2) \cdot \sin\left(\frac{p}{3} + a\right) - (T_1 + T_2) \cdot \Omega \cdot \cos\left(\frac{p}{3} + a\right) \right]; \\ B_2 &= \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \left[e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_1 \Omega}} - e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_2 \Omega}} \right]; \\ C_2 &= 1 + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_1 \Omega}} - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{1}{3} \frac{p}{T_2 \Omega}}. \end{aligned}$$

На рисунках 1÷4 представлены диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_{я}$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускоре-

ние) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при различных значениях угла управления α и моменте сопротивления электропривода $M_c = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Диаграммы контролируемых координат построены для электропривода, имеющего следующие характеристики:

$$L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}; R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}; C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}; J = 0,028125 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

При этом максимальное значение напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя принято равным $U_M = 240 \text{ В}$.

При уменьшении момента сопротивления ток якорной цепи электродвигателя уменьшается, а угловая скорость электропривода увеличивается. Для каждого угла управления α существует такое минимальное значение момента сопротивления $M_{c.\text{min}}$, при котором минимальное значение тока якорной цепи электродвигателя принимает нулевое значение. Дальнейшее уменьшение момента сопротивления электропривода приведет к переходу в режим прерывистых токов якорной цепи электродвигателя.

На рисунках 5÷8 представлены диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_{\text{я}}$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при различных значениях угла управления α и минимальных значениях момента сопротивления электропривода $M_{c.\text{min}}$.

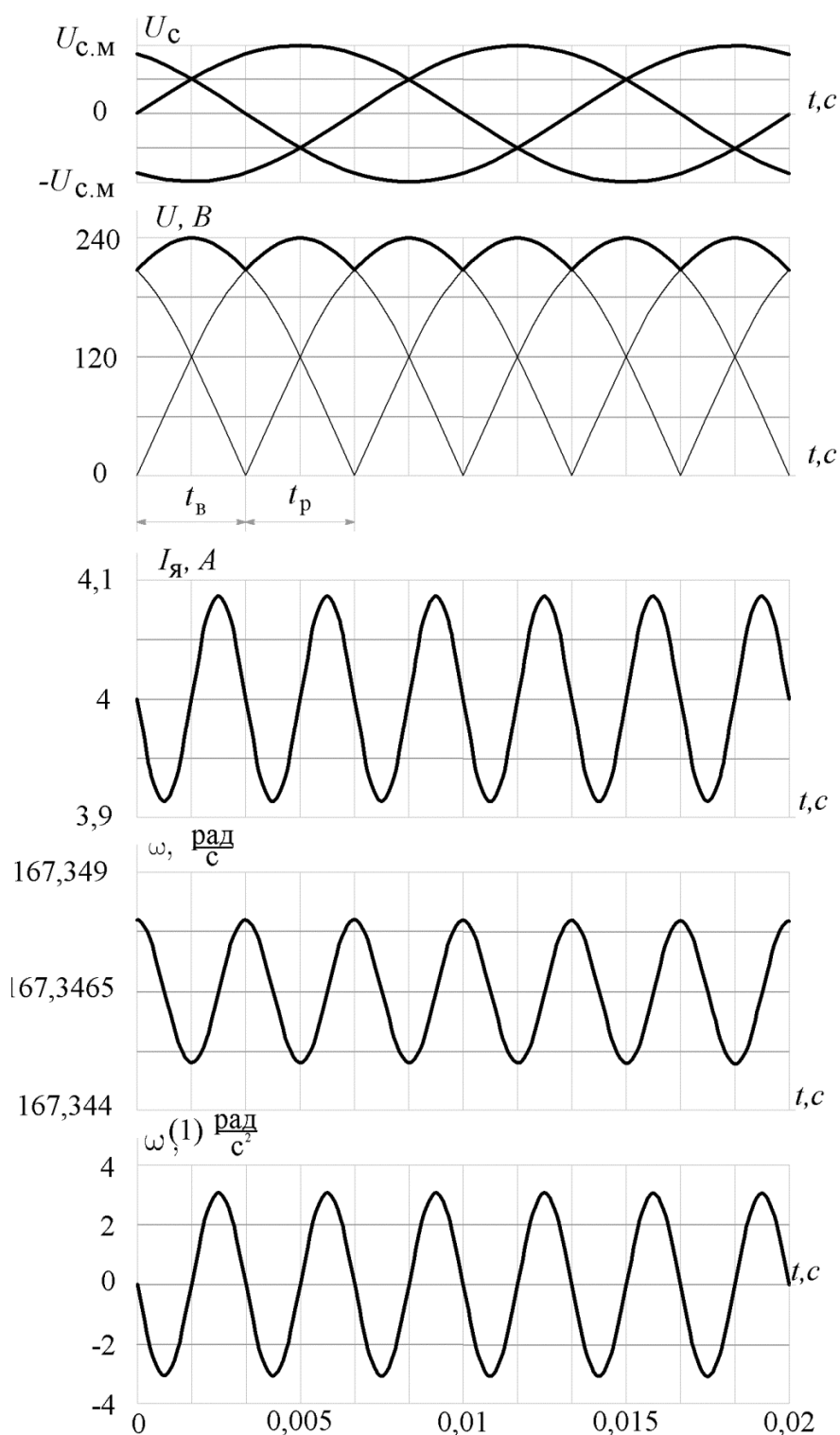


Рисунок 1 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_{я}$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha = 0$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

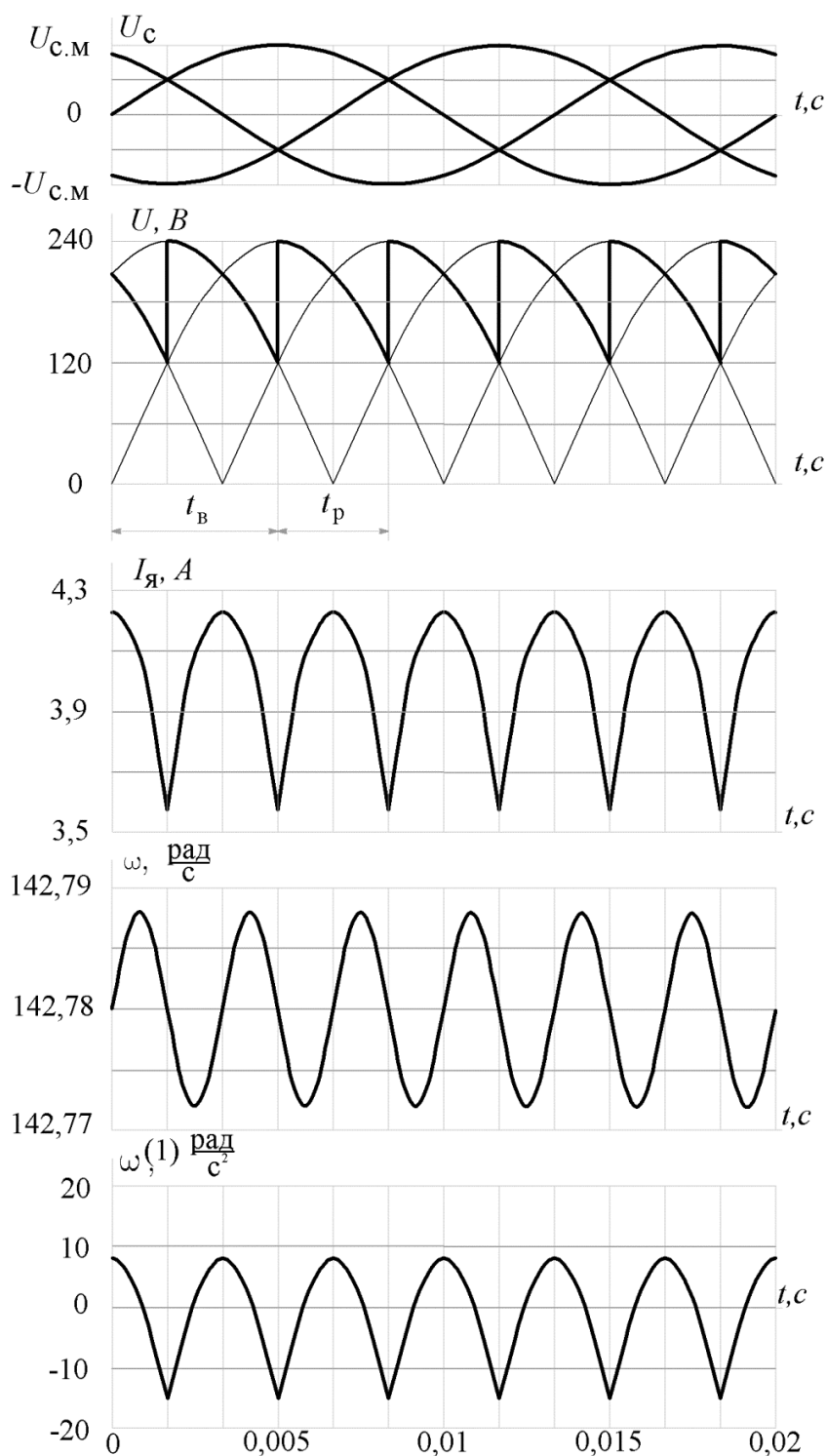


Рисунок 2 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_я$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha = \frac{\pi}{6}$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

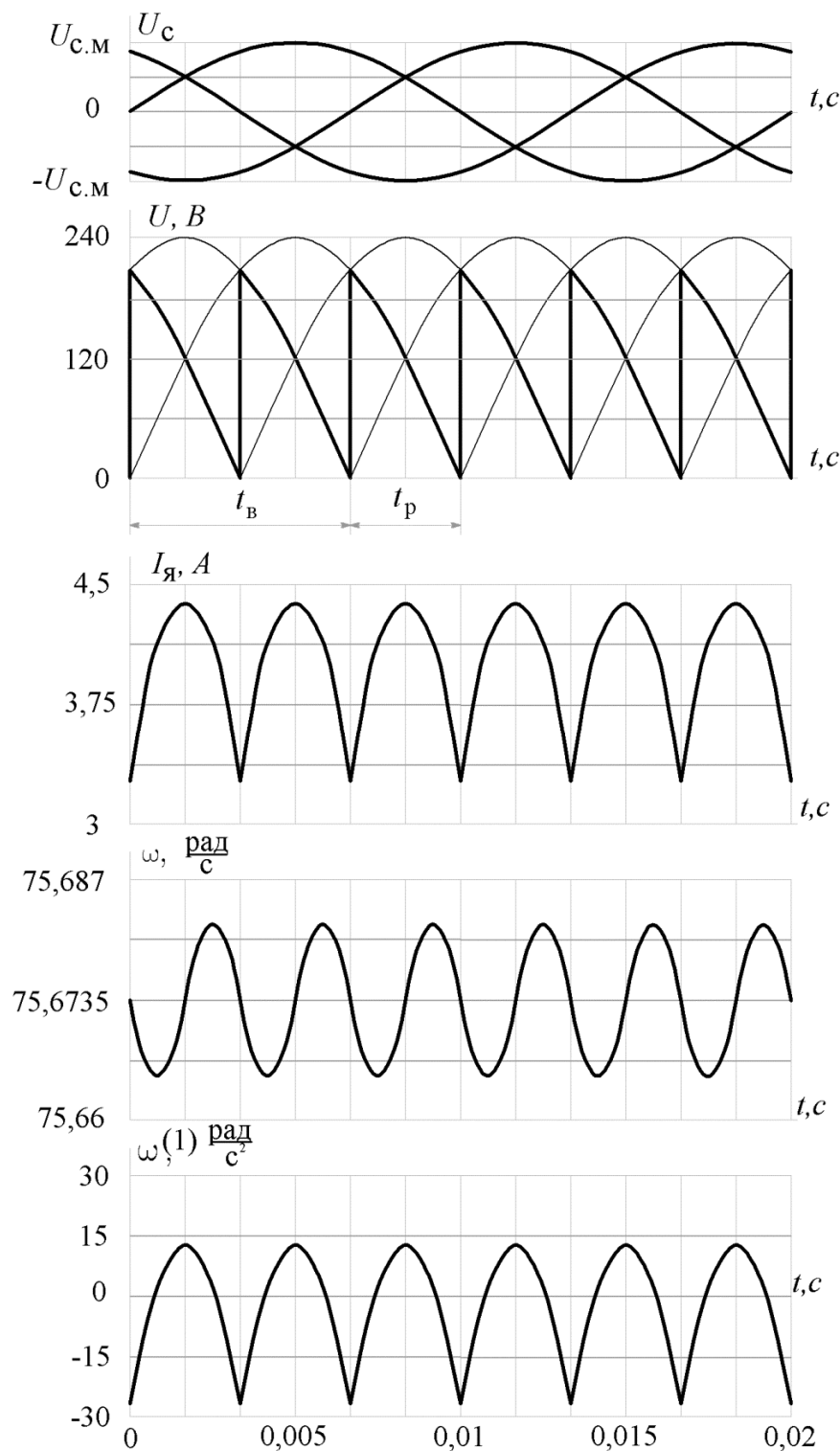


Рисунок 3 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_я$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha = \frac{\pi}{3}$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

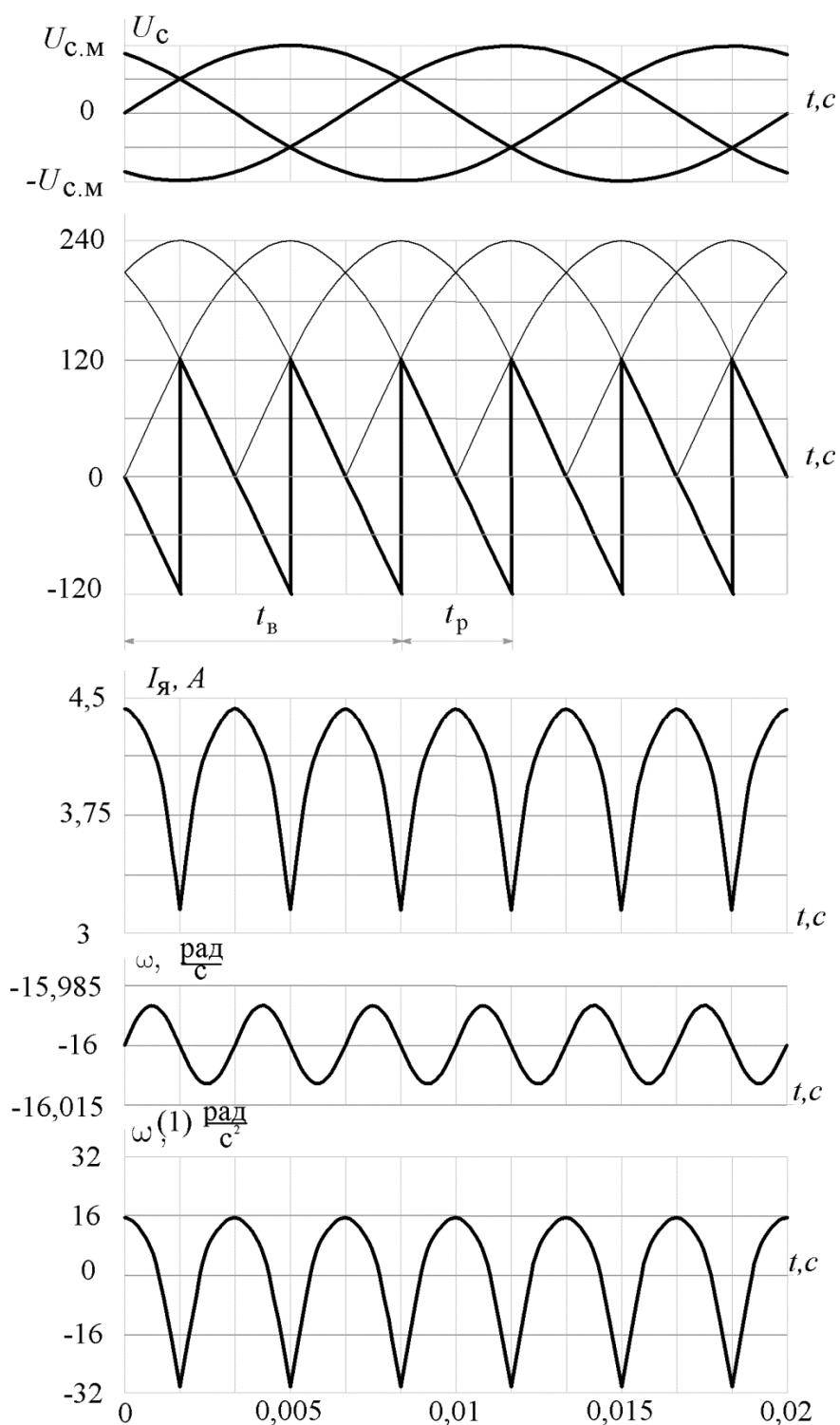


Рисунок 4 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи I_a , угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

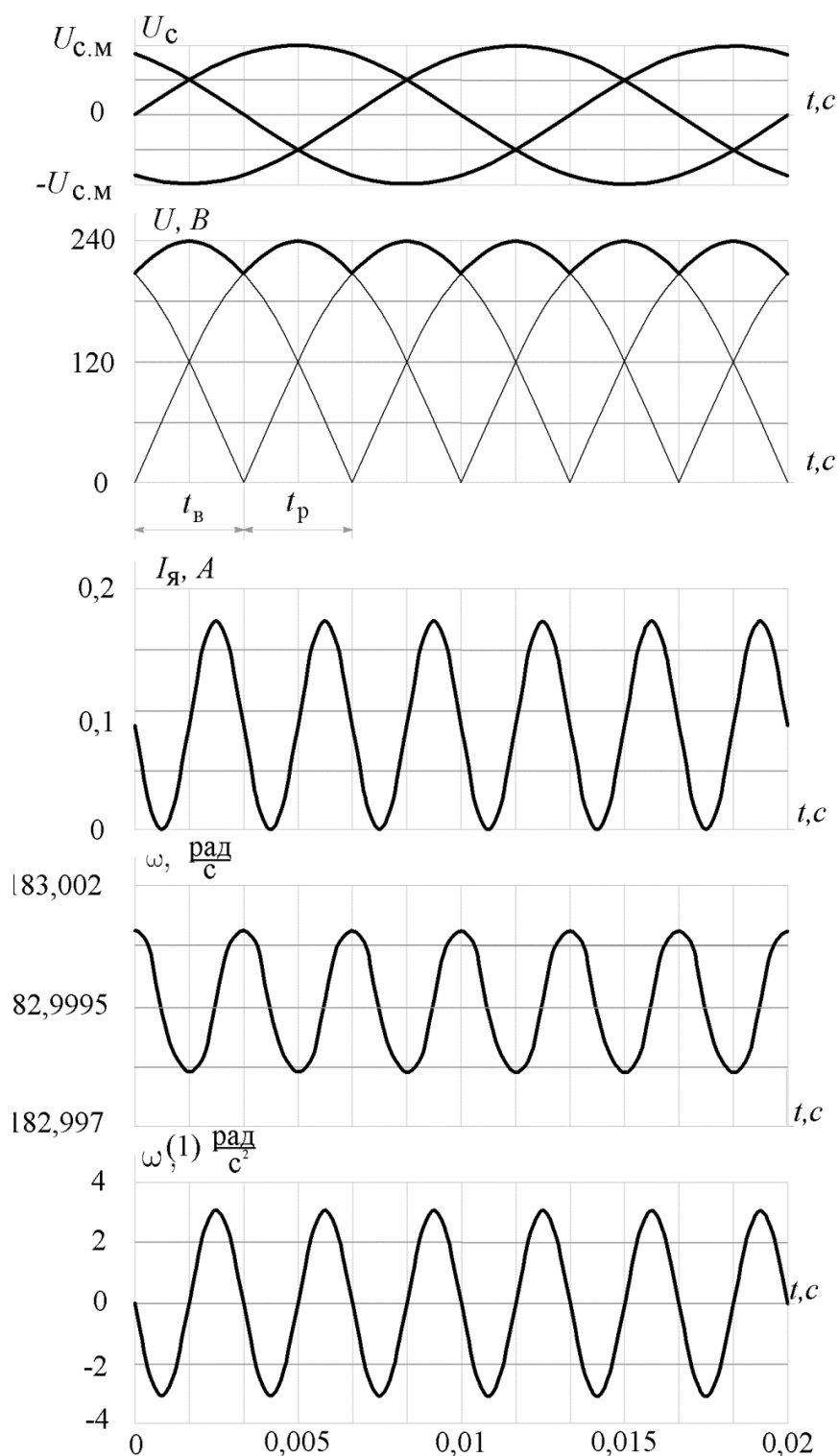


Рисунок 5 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_я$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha=0$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 0,108418 \text{ Н} \cdot \text{м}$

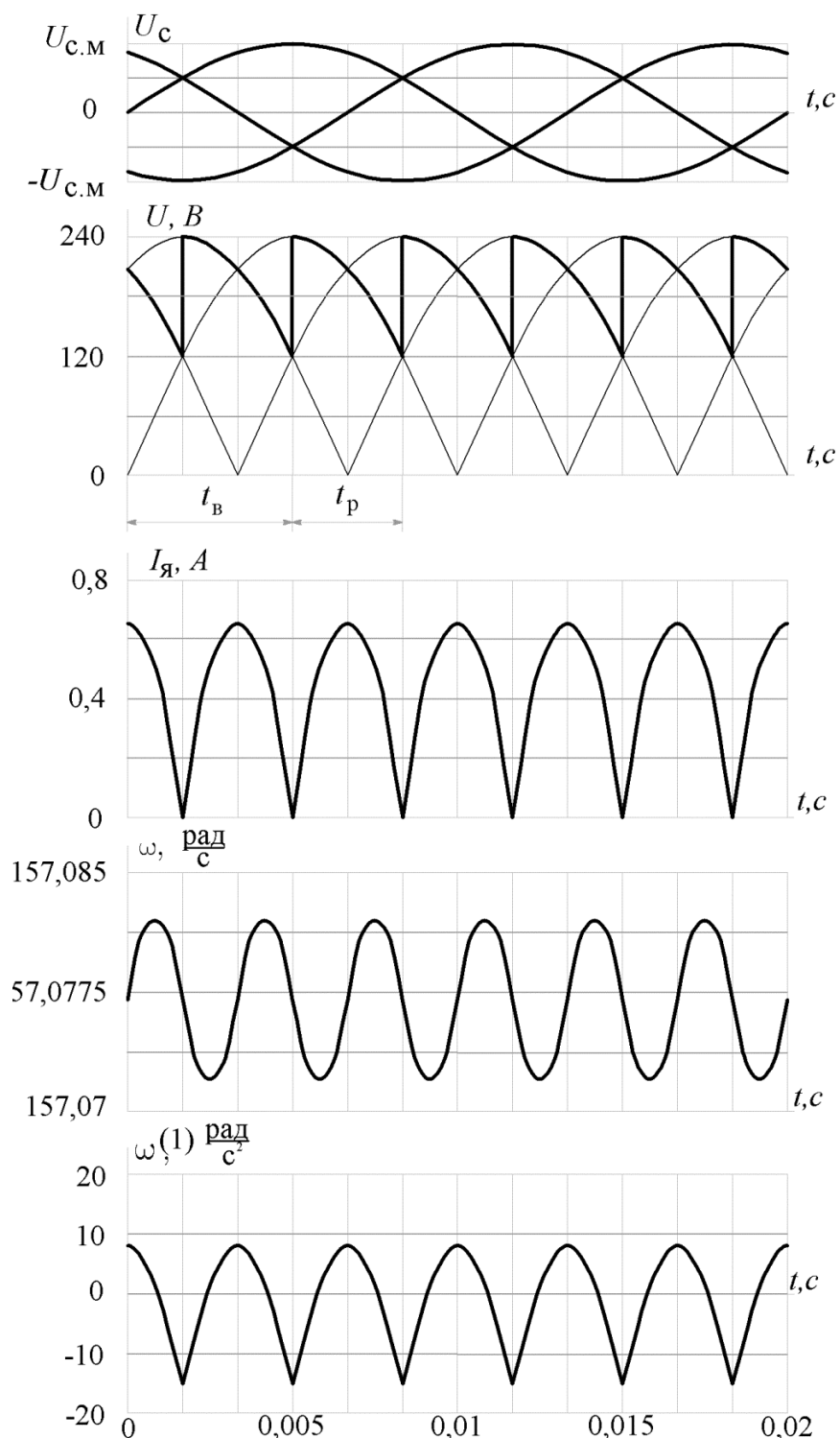


Рисунок 6 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_я$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha = \frac{\pi}{6}$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 0,533108 \text{ Н} \cdot \text{м}$

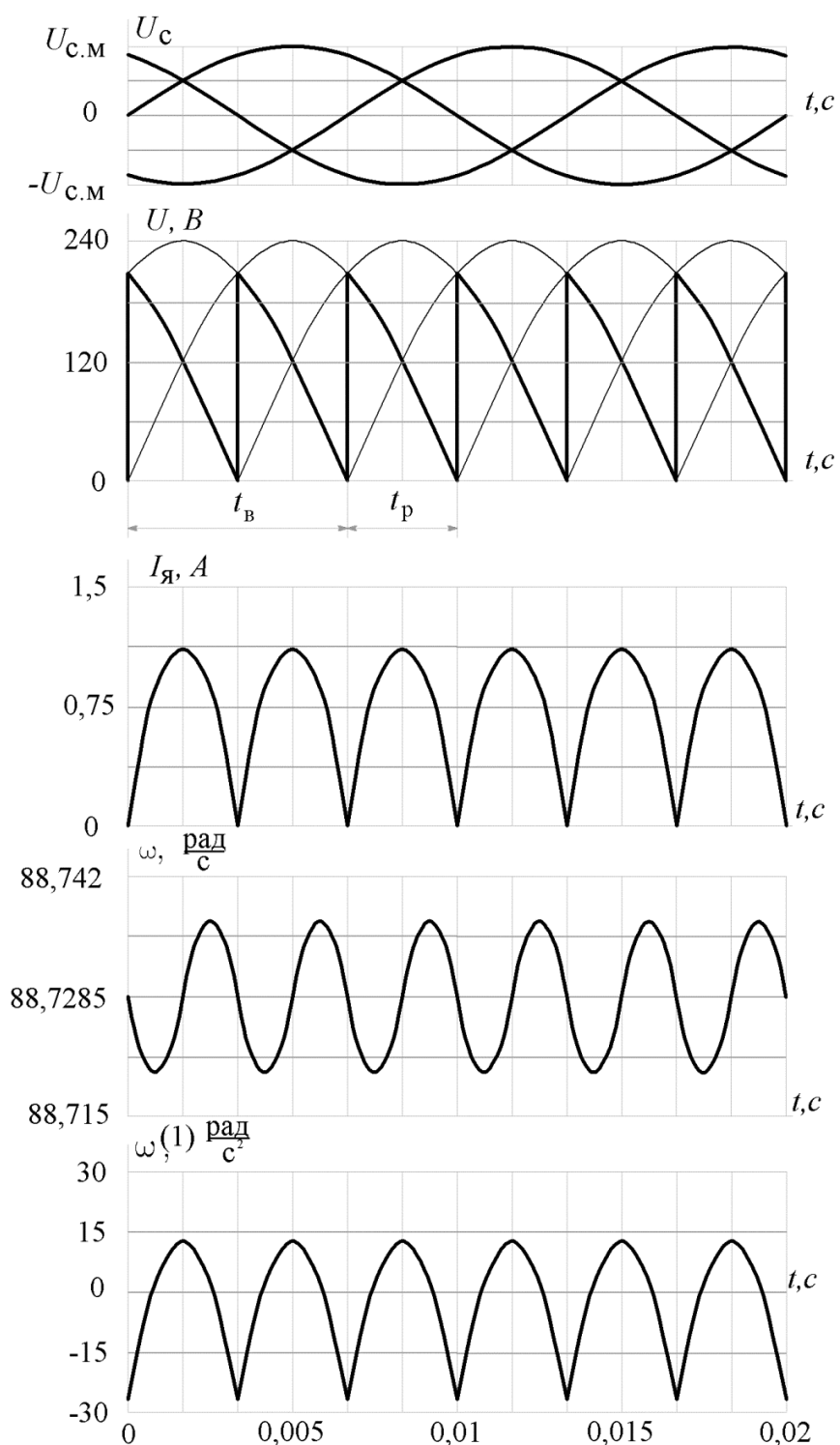


Рисунок 7 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи $I_я$, угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha = \frac{\pi}{3}$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 0,920263 \text{ Н} \cdot \text{м}$

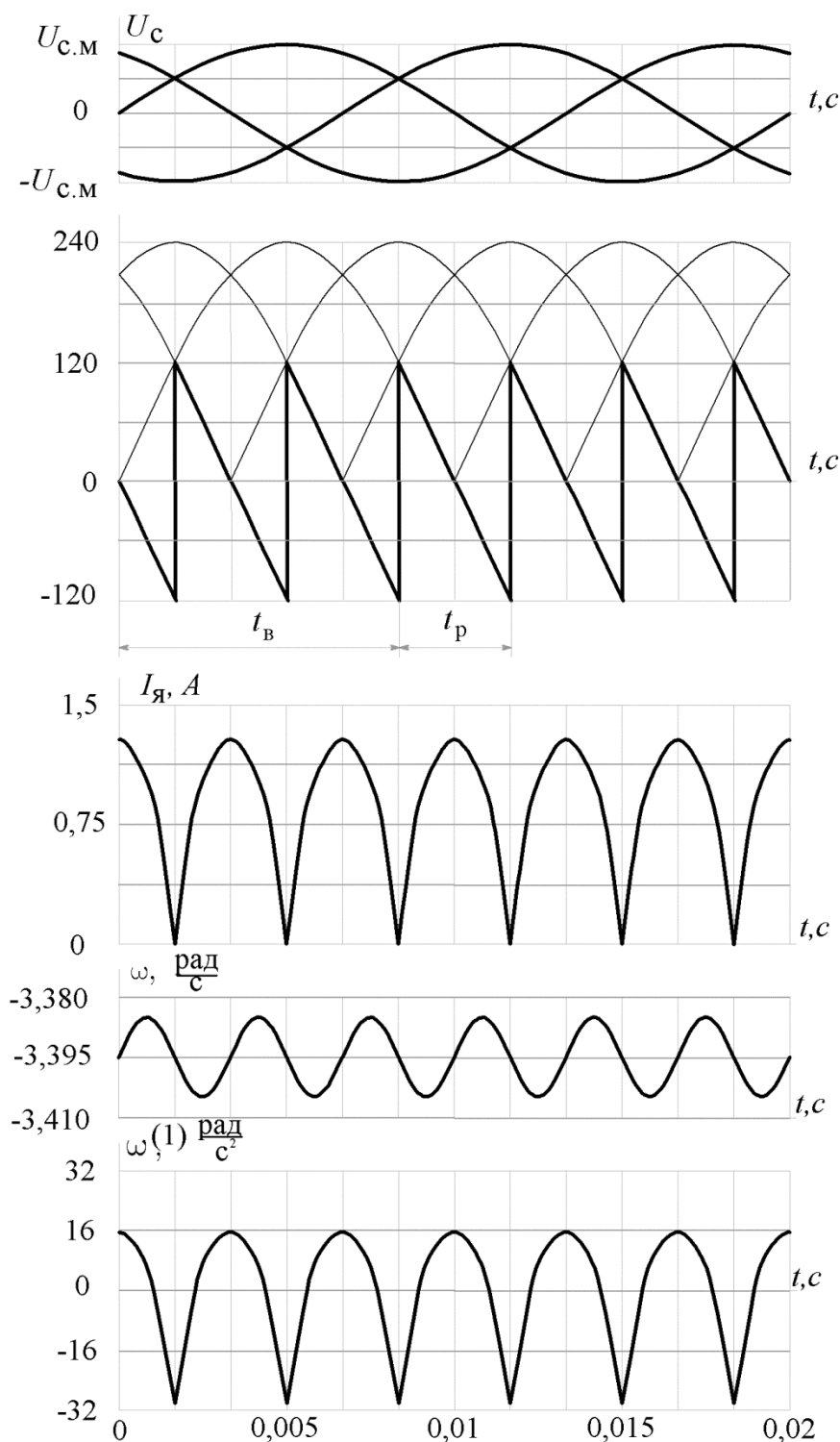


Рисунок 8 – Диаграммы напряжения сети U_c , напряжения на выходе двухтактного трехфазного мостового тиристорного преобразователя U , тока якорной цепи I_a , угловой скорости электропривода ω , первой производной угловой скорости электропривода (ускорение) $\omega^{(1)}$ в режиме непрерывного тока при $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и моменте сопротивления электропривода $M_c = 1,060832 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Как следует из диаграмм рассматриваемого электропривода, представленных на рисунках 4 и 8, при угле управления $\alpha = \frac{\pi}{2}$ угловая скорость электропривода принимает отрицательные значения.

Для рассматриваемого электропривода по полученным в результате проведенных исследований значениям минимального момента сопротивления электропривода $M_{c.min}$ при различных углах управления α на рисунке 9 приведена граница, разделяющая области существования режимов непрерывного и прерывистого токов якорной цепи электродвигателя.

На рисунке 10 приведены: зависимость размаха отклонений тока якорной цепи электродвигателя $\Delta I_{я}$ от угла управления α ; зависимость размаха отклонений угловой скорости электропривода $\Delta \omega$ от угла управления α . Следует отметить, что размах отклонений тока якорной цепи электродвигателя $\Delta I_{я}$ и размах отклонений угловой скорости электропривода $\Delta \omega$ практически не изменяются при варьировании момента сопротивления электропривода.

Проведены дополнительные исследования установившихся вынужденных колебаний в электроприводе постоянного тока с тиристорным преобразователем с целью определения границы области непрерывных токов якорной цепи двигателя, при которой угловая скорость электропривода имеет только положительное значение. Для рассматриваемого электропривода такая граница изображена пунктирной линией на рисунке 9.

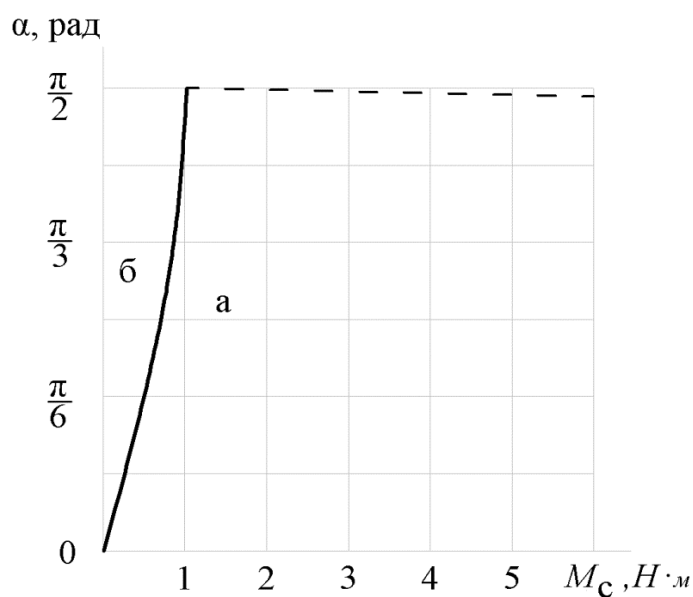


Рисунок 9 – Области существования различных режимов работы электропривода с тиристорным преобразователем: а) режим непрерывных токов; б) режим прерывистых токов

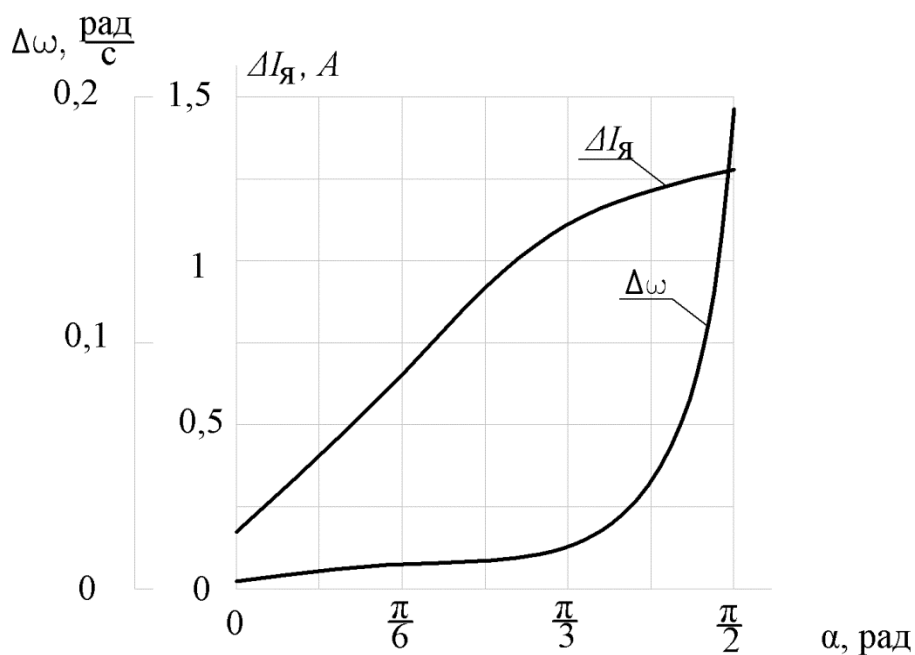


Рисунок 10 – Зависимости размаха отклонения тока якорной цепи электродвигателя ΔI_a и размаха отклонений угловой скорости $\Delta \omega$ электропривода от угла управления α в режиме непрерывных токов

Выводы

Разработано математическое обеспечение для определения размаха отклонений тока якорной цепи и размаха отклонений угловой скорости электропривода от угла управления в электроприводах постоянного тока с тиристорным преобразователем в режиме непрерывных токов.

Полученное математическое обеспечение позволяет определить величины размахов отклонений тока якорной цепи и отклонений угловой скорости электропривода постоянного тока с тиристорным преобразователем в режиме непрерывных токов от угла управления в электроприводах на стадии проектирования. Если размах отклонений тока якорной цепи электродвигателя или размах отклонений угловой скорости электропривода не удовлетворят требованиям, предъявляемым технологическим процессом, то необходимо разработать соответствующие мероприятия на стадии проектирования.

Список литературы

- 1 Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.:Энергия, 1979. – 616 с.
- 2 Добробаба Ю.П. Электрический привод. учеб. пособие /Кубан. гос. технол. ун-т. Краснодар: Изд-во ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2013. – 303 с.