рассеивается в элементах схемы инвертора, что должно учитываться при расчете и выборе этих элементов.

Задание снижения частоты при торможении осуществляется посредством интегратора, и при скачкообразном уменьшении управляющего сигнала частота снижается по экспоненциальному закону с постоянной времени, определяемой параметрами R и C.

Уравнения движения и их решение для мягкого режима торможения при экспоненциальном законе снижения частоты аналогичны уравнениям для режимов пуска, только с разницей в знаке ε.

Установившийся режим работы системы электропривода является основным технологическим режимом, определяющим производительность и качество обработки изделий на станке. Поэтому все основные качественные показатели системы регулирования (диапазон, устойчивость, быстродействие, статизм и др.) обусловлены данным режимом.

Технико-экономические показатели рассматриваемой структуры частотнорегулируемого электропривода позволяют ей конкурировать с другими существующими схемами регулируемых приводов как постоянного, так и переменного тока.

Литература

1. Вaракса А.П., Железняков В.В. Применение тиристорных преобразователей и полупроводниковых устройств управления в электроприводах металлорежущих станков. Минск, 1973.
2. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. М., 1966.

В.Л. Анхимюк, Л.Ф. Караульная, В.А. Новицкая

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОБОБЩЕННЫХ ФУНКЦИЙ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ СЛОЖНОМ ЗАКОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ОТКРЫВАНИЯ ВЕНТИЛЕЙ

В данной статье на базе метода обобщенных функций [1] определяются зависимости скорости и тока двигателя в виде явных функций времени с учетом дискретности преобразователя и изменения э.д.с. двигателя за период питающего напряжения

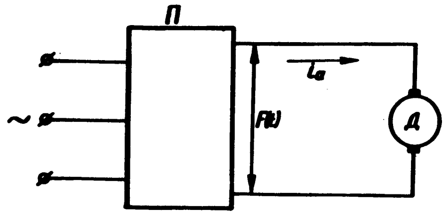

Рис. 1. Принципиальная схема.

при сложном законе изменения угла открывания вентилей. Подобный режим может возникнуть, например, в замкнутых системах электропривода при разгоне либо торможении двигателя. Процессы рассматриваются при "идеальной" коммутации вентилей.

Электромеханический переходный процесс системы преобразователь фазового управления - двигатель постоянного тока (рис. 1) описывается дифференциальными уравнениями

$$\varepsilon + i + T \frac{di}{dt} = F(t) , \qquad (1)$$

$$i_c + T_{эм} \frac{d\varepsilon}{dt} = i \qquad (2)$$

при начальных условиях

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_0 , \; i(0) = i_0 .$$

Здесь $\varepsilon = \frac{e}{U_м} = \frac{\omega}{\omega_м}$ - относительная скорость (э.д.с.) двигателя, где $U_м$, $\omega_м$ - амплитудное значение питающего напряжения и соответствующая ему базовая скорость; $i = \frac{I}{I_м}$, $i_c = \frac{I_c}{I_м}$ - относительные значения тока главной цепи и тока, соответствующего статической нагрузке, где $I_м = \frac{U_м}{R}$ - базовый ток, равный отношению амплитуды напряжения $U_м$ к сопротивлению главной цепи; T, $T_{эм}$ - электромагнитная и электромеханическая постоянные времени; $F(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \beta_t^k \times \left[1(\alpha_t^k) - 1(\alpha_t^{k+1})\right]$ - функция управления, характеризующая закон изменения выходного напряжения преобразователя во времени,

где $\beta_t^k = \omega t + \vartheta - \lambda(k-1)$; $\alpha_t^k = \omega t - l(k-1)$; $\lambda = \frac{2\pi}{m}$;
l – продолжительность проводимости вентиля, зависящая от закона изменения угла открывания вентиля во времени; ϑ – угол открывания вентиля; k – порядковый номер промежутка проводимости; m – число пульсов за период питающего напряжения.

При определенной гладкости функции $F(t)$ и при $T_{эм} \neq ЧТ$ это решение системы (1) – (2) может быть представлено в виде

$$\varepsilon(t) = -i_c + \varepsilon^*(t) + q\int_0^t (e^{p_1\xi} - e^{p_2\xi}) F(t-\xi)\, d\xi, \quad (3)$$

где p_1; p_2 – корни характеристического уравнения системы,

$$\varepsilon^*(t) = \frac{1}{p_1}\varepsilon_1^* e^{p_1 t} - \frac{1}{p_2}\varepsilon_2^* e^{p_2 t},$$

$$\varepsilon_\nu^* = q\left[T(i_o - i_c) - \frac{1}{p_\nu}(\varepsilon_o + i_c)\right], q = p_1 p_2/(p_1 - p_2).$$

Подставив $F(t)$ в (3) и преобразуя в полученном выражении интегралы, содержащие единичные функции [1], по формуле

$$\int_0^t f(\xi)1[\alpha(t) - \omega\xi]d\xi = 1[\alpha(t)]\int_0^{\alpha(t)/\omega} f(\xi)d\xi, \quad (4)$$

найдем

$$\varepsilon(t) = -i_c + \varepsilon^*(t) - \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_k(t,0)\left[1(\alpha_t^k) - 1(\alpha_t^{k+1})\right] +$$
$$+ \sum_{k=1}^{\infty}\left[\Phi_k(t_1\omega^{-1}\alpha_t^k)1(\alpha_t^k) - \Phi_k(t, \omega^{-1}\alpha_t^{k+1})\right], \quad (5)$$

где

$$\Phi_k(t,\xi) = \int (e^{p_1\xi} - e^{p_2\xi})\sin\beta_{t-\xi}^k\, d\xi. \quad (6)$$

Значение скорости $\varepsilon(t)$ и тока $i(t)$ внутри n-го промежутка проводимости вентиля обозначим $\varepsilon_n(t)$ и $i_n(t)$. Учтем, что в n-м промежутке:

$$\left.\begin{aligned} 1(\alpha_t^k) &\equiv 1 \quad \text{при} \quad k = 1,2,\dots,n, \\ 1(\alpha_t^k) &\equiv 0 \quad \text{при} \quad k = n+1, n+2,\dots \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

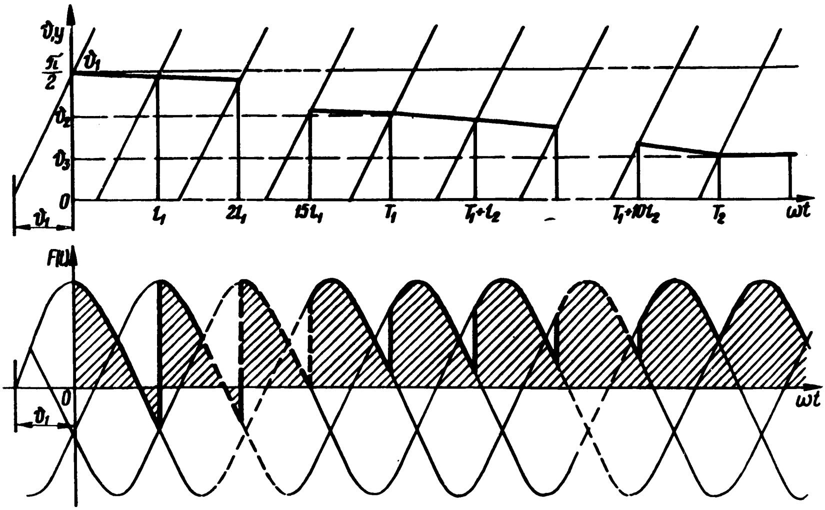

Рис. 2. Линейная диаграмма выходного напряжения преобразователя.

Тогда (5) принимает вид

$$\varepsilon(t) = -i_c + \varepsilon^*(t) - \Phi_n(t,0) + S_n(t), \tag{8}$$

где

$$S_n(t) = \sum_{k=1}^{n} \Phi_k(t, \omega^{-1}\alpha_t^k) - \sum_{k=1}^{n-1} \Phi_k(t, \omega^{-1}\alpha_t^{k+1}). \tag{9}$$

Пусть при разгоне двигателя угол открывания изменяется по сложному закону, который может быть аппроксимирован кусочно-линейной функцией, определяемой тремя отрезками прямых (рис. 2). При этом продолжительность проводимости вентилей постоянна, но различна на каждом из интервалов. Назовем эту продолжительность обобщенной длиной интервала проводимости и обозначим через l.

Тогда

$$l = \begin{cases} l_1 & \text{при} \quad 0 \leq \omega t < T_1; \\ l_2 & \text{при} \quad T_1 \leq \omega t < T_2; \\ \lambda & \text{при} \quad T_2 \leq \omega t < \infty, \end{cases} \tag{10}$$

$\lambda = l_\nu(1-r_\nu)$; $\vartheta_{\nu+1} = \vartheta_\nu + r_\nu T_\nu$; $T_1 = n_1 l_1$; $T_2 = T_1 + n_2 l_2$ $(\nu = 1,2)$, где n_1, n_2 – число промежутков проводимости вентиля соответственно на первом и втором интервалах изменения ϑ (по линейному закону). При вычислении $S_n(t)$ удобно ввести разность между обобщенной длиной интервала проводимости l и величиной λ, и обозначить

$$a=l-\lambda,\ b_\nu=\vartheta+\theta_\nu,\ l_\nu=-p_\nu l/\omega,\ \theta_\nu=\arcsin\frac{\omega}{\sqrt{p_\nu^2+\omega^2}}. \qquad (11)$$

Тогда (9) принимает вид

$$S_n(t)=\sum_{\nu=1}^{2} C_\nu D_n^\nu e^{p_\nu t}, \qquad (12)$$

где

$$D_n^\nu=\sigma_n(a,b_\nu,l_\nu)-e^{l_\nu}\sigma_{n-1}(a,b_\nu+l,l_\nu), \qquad (13)$$

$$\sigma_n(a,b,l)=\sum_{k=1}^{n} e^{(k-1)l}\sin\left[a(k-1)+b\right],$$

$$C_\nu=(-1)^{\nu+1}\frac{q}{\omega}\sin\theta_\nu. \qquad (14)$$

Сумма в (14) вычисляется по формуле

$$\sum_{k=0}^{n=1} e^{kl}\sin(ak+b)=\tfrac{1}{2}\left[d(n)-d(0)\right](\operatorname{ch}l-\cos a)^{-1},$$

$$d(n)=e^{nl}\left[\sin(a(n-1)+b)-e^{-l}\sin(an+b)\right].$$

Подставив (6), (12) в (8), получаем

$$\varepsilon_n(t)=-i_c+A\sin(\beta_t^n+\theta_1+\theta_2)+S_n e^{p_1 t}-S_n^2 e^{p_2 t}. \qquad (15)$$

При этом

$$i_n(t)=i_c+T_{эм}\left[A_\omega\cos(\beta_t^n+\theta_1+\theta_2)+p_1 S_n^1 e^{p_1 t}-p_2 S_n^2 e^{p_2 t}\right], \qquad (16)$$

где

$$A=\omega\cos\theta_1\cos\theta_2,\ S_n^\nu=\frac{1}{p_\nu}\varepsilon_\nu+\frac{q}{\omega}D_n^\nu\sin\theta_\nu. \qquad (17)$$

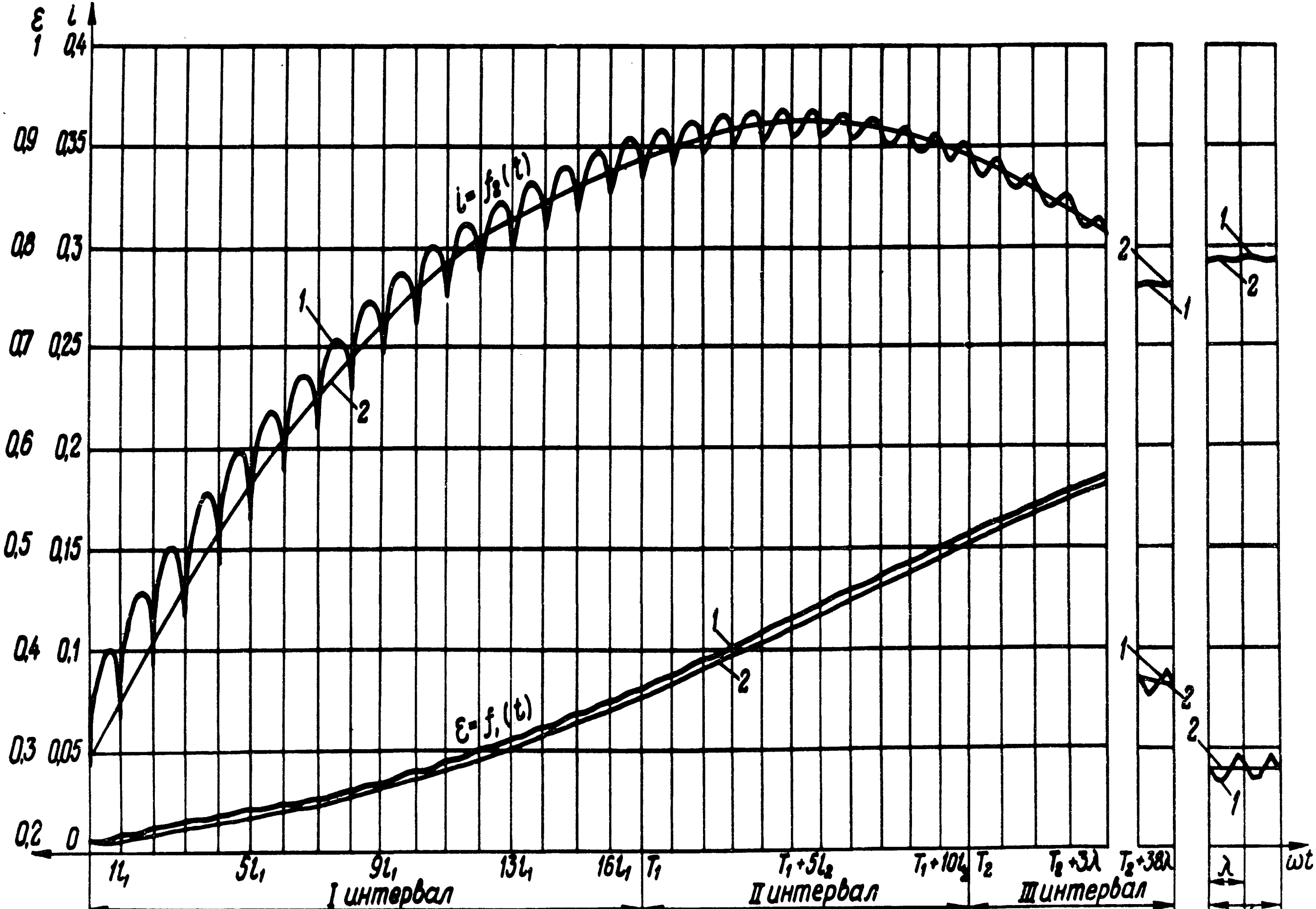

Рис. 3. Графики переходных процессов.

В первом интервале $n < n_1$ и в (13) следует положить

$$l = l_1, \quad l_\nu = -p_\nu l_1/\omega, \quad a = l_1 - \lambda. \tag{18}$$

Во втором интервале $n_1 < n < n_2$ и в (13), (14) l, l_ν, a принимаются значения (18) при $k = 1, 2, \ldots, \bar{n}_1$, а при $k = n_1 + 1;\ n_1 + 2, \ldots, n$ имеем

$$l = l_2, \quad l_\nu = -p_\nu l_2/\omega, \quad a = l_2 - \lambda. \tag{19}$$

В третьем интервале $n > n_1 + n_2$ и в (13), (14) величины l, l_ν, a принимают значения (18) при $k = 1, 2, \ldots, n_1$ и значения (19) при $k = n_1 + 1,\ n_1 + 2, \ldots, n_1 + n_2$; а при $k = n_1 + n_2 + 1, \ldots$ равны

$$l = \lambda, \quad l_\nu = -p_\nu \lambda/\omega, \quad a = 0.$$

На рис. 3 приведены графики (кривые 1) переходных процессов в электроприводе $\varepsilon = f_1(t)$ и $i = f_2(t)$, рассчитанные по приведенным формулам. Размах пульсаций тока в начале переходного процесса больше размаха пульсаций в установившемся режиме в пять раз. На рис. 2 приведены кривые 2 переходного процесса, вычисленные при средних значениях переменных.

Литература

1. Анхимюк В.Л., Караульная Л.Ф., Новицкая В. А. Исследование переходных процессов вентильного электропривода с фазовым управлением методом обобщенных функций. – "Изв. вузов. Энергетика", 1973, № 12.

Б.И. Фираго

СОПОСТАВЛЕНИЕ СИЛОВЫХ СХЕМ ТИРИСТОРНЫХ ЦИКЛОКОНВЕРТОРОВ С НУЛЕВЫМ И БЕЗ НУЛЕВОГО ПРОВОДА ДЛЯ РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНОГО ТОКА НАГРУЗКИ

На практике находят применение разнообразные силовые схемы тиристорных циклоконверторов [1]. Представляет интерес сравнить основные показатели качества преобразования электроэнергии циклоконверторами с нулевым и без нулевого провода для получения одинаковой мощности первой гармоники в нагруз-