

Общее время торможения равно

$$t_{\tau} = t_1 + t_2. \quad (9)$$

### Литература

1. Лapidус А.И. Индукционно-динамическое торможение асинхронных двигателей в станочных электроприводах. - В сб.: Электротехническая промышленность. Сер. "Электропривод", 1975, вып. 4, с. 26-28.
2. Лapidус А.И. Тиристорная схема торможения асинхронного двигателя. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, 1979, вып. 6, с. 98-101.
3. Розенблат М.А. Магнитные усилители. - М., 1960, с. 538.
4. Соколов М.М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. - М., 1967, с. 201.
5. Каплан Н.А., Лapidус А.И. Безвибрационное торможение асинхронных двигателей по несимметричным схемам с вентилями, - Электротехника, 1972, № 11, с. 19-23.

УДК 621.314.53

В.Л.Анхимюк, докт. техн. наук,  
В.А.Новицкая, канд. техн. наук,  
Е.П.Раткевич, инженер (БПИ)

### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМЕ ПРЕРЫВИСТЫХ ТОКОВ

Одной из задач проектирования систем тиристорных электроприводов является прогнозирование динамических свойств заданной структуры объекта управления при различных режимах работы и значениях ее параметров.

В литературе недостаточно освещен вопрос динамических характеристик электроприводов в режиме прерывистых токов.

Наиболее полное решение поставленной задачи возможно при использовании в процессе исследования переходных режимов мгновенных значений фазовых координат объекта управления (ОУ), под которым будем понимать электродвигатель совместно с преобразователем. Динамическая модель ОУ представлена на рис. 1, где ФУ - фазосдвигающее устройство тиристорного преобразователя ТП; ДИС - ключ, имитирующий дискретность ТП, замыкающийся в контактные моменты времени и находящийся в разомкнутом состоянии в течение всего интервала дискретности,

КОМ – ключ, имитирующий коммутацию тока с тиристора на тиристор; Тр – согласующий трансформатор; РПТ – диод, имитирующий режим прерывистого тока; Т и  $T_M$  – электромагнитная и электромеханические постоянные времени привода;  $U_y$  – напряжение управления;  $\vartheta_0$  – угол открывания вентилей преобразователя;  $F(p)$  – операторное изображение функции управления, представляющей собой последовательность импульсов выходного напряжения преобразователя,  $I_c R_0$  – возмущающее воздействие.

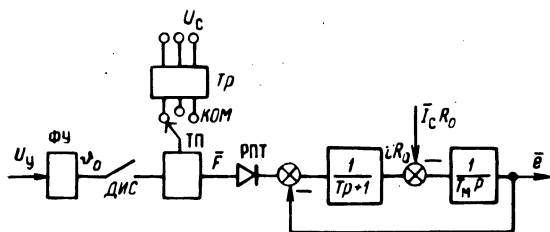


Рис. 1. Динамическая модель объекта управления.

Математическая модель ОУ относительно задающего воздействия при общепринятых допущениях

$$\epsilon + i + T \frac{di}{dt} = F(p); \quad (1)$$

$$i - T_M \frac{d\epsilon}{dt} = i_c, \quad (2)$$

где  $\epsilon$ ,  $i$ ,  $i_c$  – относительные мгновенные значения скорости, тока главной цепи и статического тока соответственно [1].

Функция управления при любом законе изменения угла открывания может быть записана в виде

$$F(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^r f_{js}(t) (1(\alpha_{j,s-1}(t)) - 1(\alpha_{js}(t))). \quad (3)$$

Аргументы единичных функций  $\alpha_{j,s-1}(t)$  и  $\alpha_{js}(t)$  характеризуют моменты начала и конца действия функции  $f_{js}(t)$ , представляющей собой выходное напряжение преобразователя в  $s$ -й зоне  $j$ -го интервала, содержащего  $r$  зон

$$\alpha_{js}(t) = \omega(t - t_{js}); \quad \alpha_{j,s-1}(t) = \omega(t - t_{j,s-1}), \quad (4)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота сети;  $t_{j,s-1}$ ,  $t_{js}$  – моменты начала и конца действия функции  $f_{js}(t)$ .

В режиме прерывистых токов в каждом интервале выделяются две зоны и в формуле (3)  $r = 2$ , при этом  $s = 1$  соответ-

ствуует токовой,  $s = 2$  бестоковой зоне  $j$ -го интервала дискретности;  $t_{j_s}$  ( $s = 0, 2$ ) - соответственно моменты начала интервала дискретности ( $s = 0$ ), окончания токовой ( $s = 1$ ) и бестоковой ( $s = 2$ ) зон.

В токовой зоне  $j$ -го интервала ( $t_{j_0} \leq t \leq t_{j_1}$ ) выходное напряжение преобразователя

$$f_{i1}(t) = \sin \beta_j(t),$$

где  $\beta_j(t) = \vartheta_{\text{о.нач}} + \alpha_{j_0}(t)$ ;  $\alpha_{j_0}(t) = \omega(t - t_{j_0})$ ;  $\vartheta_{\text{о.нач}}$  - угол открывания на первом интервале дискретности.

В бестоковой зоне ( $t_{j_1} \leq t \leq t_{j_2}$ ,  $i = 0$ ,  $di/dt = 0$ ) получим соотношение  $f_{j_2}(t) = \epsilon(t)$  или, как это следует из уравнения (2),

$$f_{j_2}(t) = \epsilon(t_{j_1}) - i_c T_M^{-1}(t - t_{j_1}).$$

При расчете рассматриваемого режима все слагаемые в (3) отличны от нуля. Продолжительность токовых зон интервалов

$$\lambda_j = \omega(t_{j_1} - t_{j_0}) \neq 1_j \quad \text{при } j = \overline{1, n}.$$

В результате решения системы (1)-(2) для ОУ без согласующего трансформатора при ненулевых начальных условиях и  $T_M \neq 4T$  получим для  $N$ -го интервала:

для токовой зоны

$$\epsilon_{N1}(t) = -i_c + \Phi_{N1}(t, 0) + s_{N1}^1 e^{p_1 t} - s_{N1}^2 e^{p_2 t}; \quad (5)$$

для бестоковой зоны

$$\epsilon_{N2}(t) = -i_c + \Phi_{N2}(t, 0) + s_{N2}^1 e^{p_1 t} - s_{N2}^2 e^{p_2 t}, \quad (6)$$

где  $p_\nu$  ( $\nu = 1, 2$ ) - корни характеристического уравнения

$$T_M T_p^2 + T_p + 1 = 0.$$

$$\text{Здесь } \Phi_{Ns}(t, 0) = \sum_{\nu=1}^2 (-1)^\nu I_{Ns}^\nu(t, 0);$$

$$s_{N1}^\nu = \epsilon_*^\nu + I_{N1}^\nu(0, -t_{N0}) + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{s=1}^2 (I_{js}^\nu(0, -t_{j,s-1}) - I_{js}^\nu(0, -t_{js}));$$

$$s_{N2}^\nu = s_{N1}^\nu + J_{N2}^\nu(0, -t_{N1}) - I_{N1}^\nu(0, -t_{N1});$$

$$i_{N1}^v(t, \xi) = e^{p_v \xi} (p_v^2 + \omega^2)^{-1} (\omega \cos \varphi_{N1}(t, \xi) - p_v \sin \varphi_{N1}(t, \xi));$$

$$i_{N2}^v(t, \xi) = q p_v^{-1} e^{p_v \xi} (\epsilon_{N1}(t_{N1}) - i_c T_M^{-1} (t - \xi - t_{N1}) + p_v^{-1});$$

$$\varphi_{N1}(t, \xi) = \omega(t - \xi) + \varphi_{ON} - (N - 1) \frac{2\pi}{m};$$

$m$  - пульсность ТП.

Выражение для тока в токовой зоне ( $s = 1$ ) получим, используя уравнение (2) и соотношение (5)

$$i_{N1} = i_c + T_M \left( \frac{d}{dt} \Phi_{N1}(t, 0) + p_1 s_{N1}^1 e^{p_1 t} - p_2 s_{N2}^2 e^{p_2 t} \right). \quad (7)$$

На основании выражений (5)-(7) составлены алгоритмы и программа расчетов на ЦВМ. По данным расчетов, кроме указанных зависимостей, были определены длина активной зоны ( $\lambda$ ), коэффициент использования двигателя по току ( $K_{\tau}$ ); среднее значение тока и максимальное и минимальное значения скорости двигателя на интервале дискретности в переходном (пуск двигателя) и установившемся режимах.

Кроме того, был проведен сравнительный анализ изменения фазовых координат при пуске двигателя при скачке угла открывания ТП и в случае использования оптимальной пусковой диаграммы тока, соответствующей оптимальному по быстродействию переходному процессу [2]. Формирование прямоугольной пусковой токовой диаграммы производилось путем поиска максимального мгновенного значения тока в пределах каждого интервала дискретности, ограниченного допустимым значением. Характер управления формировался так, чтобы процесс не имел перерегулирования.

Расчеты производились для следующих значений параметров ОУ:  $T = 0,0004-0,02$  с;  $T_M = 0,006-0,1$  с;  $m = 2, 3, 6$ ;  $i_c = 0,01-0,1$ .

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены графики переходных процессов при  $T = 0,0025$  с;  $T_M = 0,025$  с;  $m = 3$ ;  $i_c = 0,05$ ;  $\varphi_0 = 110^\circ$  эл. (в установившемся режиме) в функции номера интервала дискретности ( $n$ ). Переходные процессы рассчитаны при одинаковых максимальных значениях тока при пуске ( $i_M = 0,4$ ).

В режиме прерывистых токов с уменьшением длины активной зоны увеличивается эквивалентное значение сопротивления главной цепи, поэтому динамика электропривода определяется возрастающей электромеханической постоянной времени электропривода, которую назовем эквивалентной электромеханической постоянной времени —  $T_M$ .

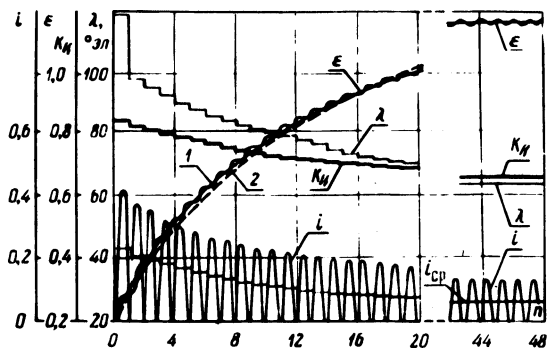


Рис. 2. Пуск электродвигателя при скачке угла открывания преобразователя.

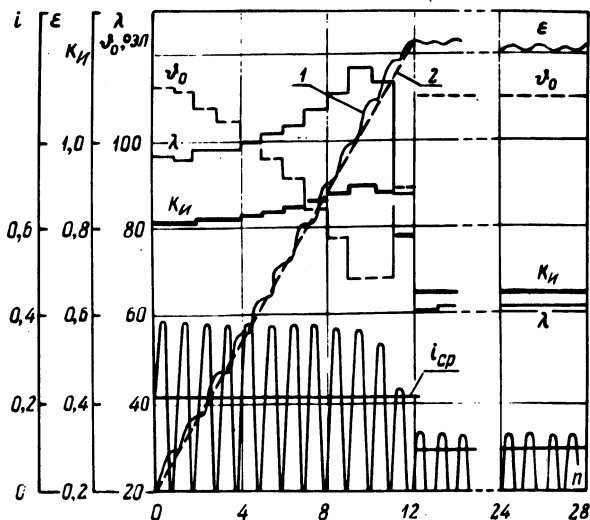


Рис. 3. Пуск электродвигателя при формировании оптимальной пусковой токовой диаграммы.

Рис. 4. Определение эквивалентной постоянной времени переходного процесса в режиме прерывистых токов.

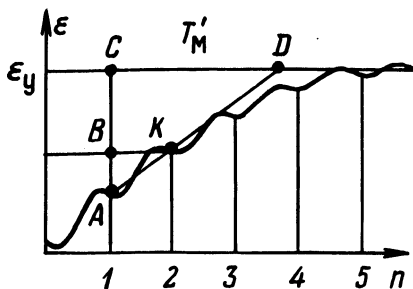
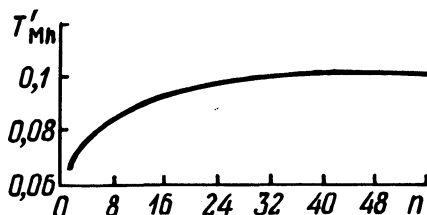


Рис. 5. Изменение эквивалентной электрохимической постоянной времени привода при пуске двигателя.



Методику определения  $T'_M$  на  $n$ -м интервале дискретности иллюстрирует рис. 4, где  $\epsilon_y$  - скорость в установившемся режиме;  $\epsilon_{n-1}$  и  $\epsilon_n$  - в начале  $(n-1)$  и  $n$ -го интервалов дискретности. Так как  $T'_{Mn} = CD$ , то из подобия треугольников следует

$$T'_{Mn} = \frac{2\pi}{m\omega} \cdot \frac{\epsilon_y - \epsilon_{n-1}}{\epsilon_n - \epsilon_{n-1}}.$$

На рис. 5 представлено изменение  $T'_{Mn}$  при пуске электропривода с параметрами  $T = 0,0025$  с;  $T_M = 0,025$  с;  $m = 3$ ;  $\varphi_0 = 110^\circ$  эл.

Увеличивающаяся в режиме прерывистых токов  $T_M$  обуславливает при скачке угла открывания вентилей ТП изменение скорости двигателя по экспоненте. Поэтому скорость двигателя в конце  $n$ -го интервала дискретности можно определить по выражению

$$\epsilon_{kn} = \epsilon_y + (\epsilon_{On} - \epsilon_y) e^{-\frac{t_{ин}}{T'_{Mn}}} \quad (8)$$

где  $\epsilon_{On}$  - скорость в начале  $n$ -го интервала дискретности;  $t_{ин}$  - время интервала дискретности.

Выражение (8) дает возможность с высокой степенью точности построить переходный процесс в режиме прерывистых то-

ков при скачке угла открывания (рис. 2, кр. 1 – изменение среднего на интервале дискретности значения скорости, кр. 2 – построена по выражению (8)).

### Литература

1. Анхимюк В.Л., Караульная Л.Ф., Новицкая В.А. Исследование переходных процессов вентильного электропривода с фазовым управлением методом обобщенных функций. – Изв. вузов СССР. Энергетика, 1973, № 12, с. 50–56.
2. Анхимюк В.Л., Новицкая В.А. Машинный синтез управления, обеспечивающего оптимальность переходного процесса вентильного электропривода с учетом дискретности преобразователя. – Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1979, № 5, с. 401–406.