

УДК 621.313.333

### ***Н.Н. Буторин***

Буторин Николай Николаевич родился в 1923 г., окончил в 1951 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры промышленного транспорта Архангельского государственного технического университета. Имеет 40 печатных работ.



## **ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ**

Определены параметры системы дифференциальных уравнений для исследования переходных процессов через каталожные данные асинхронных электродвигателей.

электропривод, асинхронный, переходные.

При конструировании лесопромышленного оборудования важен правильный выбор электродвигателя. Двигатель завышенной мощности имеет низкий коэффициент полезного действия, а следовательно, и большие потери энергии. Кроме того, низкий коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) такого двигателя вызывает дополнительные потери энергии в питающей сети.

Изучение переходных процессов в электроприводе необходимо при переменных нагрузках, в тяжелых условиях пуска, как, например, в приводе лесопильных рам, ленточных транспортеров, асинхронных двигателей, питающихся от автономных источников, и др. [1].

Для электропривода с асинхронными двигателями применяют так называемые уравнения Парка – Горева. В координатах  $X, 0, Y$ , вращающихся вместе с магнитным полем статора, они имеют вид [3]:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\Psi_{x1}}{dt} &= U_m - \omega_0 \alpha'_s \Psi_{x1} + \omega_0 \alpha'_s k_r \Psi_{x2} + \omega_0 \Psi_{y1}; \\
 \frac{d\Psi_{y1}}{dt} &= -\omega_0 \alpha'_s \Psi_{y1} + \omega_0 \alpha'_s k_r \Psi_{y2} - \omega_0 \Psi_{x1}; \\
 \frac{d\Psi_{x2}}{dt} &= -\omega_0 \alpha'_r \Psi_{x2} + \omega_0 \alpha'_r k_s \Psi_{x1} + \omega_0 s \Psi_{y2}; \\
 \frac{d\Psi_{y2}}{dt} &= -\omega_0 \alpha'_r \Psi_{y2} + \omega_0 \alpha'_r k_s \Psi_{y1} - \omega_0 s \Psi_{x2}; \\
 M &= \frac{3}{2} p \omega_0 \frac{k_r}{r_1} \alpha'_s (\Psi_{x2} \Psi_{y1} - \Psi_{x1} \Psi_{y2}); \\
 \frac{ds}{dt} &= \frac{p}{J \omega_0} (M_c - M); \\
 i_{x1} &= \omega_0 \frac{\alpha'_s}{r_1} (\Psi_{x1} - k_r \Psi_{x2}); \\
 i_{y1} &= \omega_0 \frac{\alpha'_s}{r_1} (\Psi_{y1} - k_r \Psi_{y2}),
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\Psi_{x1}, \Psi_{y1}, \Psi_{x2}, \Psi_{y2}$  – проекции потокосцеплений статора и ротора на оси  $X$  и  $Y$ ;

$U_m$  – амплитуда фазного напряжения питающей сети;

$\omega_0$  – угловая частота питающей сети;

$$\alpha'_s = \frac{r_1}{x_s \sigma}; \quad \alpha'_r = \frac{r_2}{x_r \sigma}; \quad k_s = \frac{x_0}{x_s}; \quad k_r = \frac{x_0}{x_r};$$

$M_c$  – момент сопротивления приводимого механизма;

$M$  – электромагнитный вращающий момент двигателя;

$x_0$  – индуктивное сопротивление взаимоиндукции;

$x_s(x_r)$  – синхронное реактивное сопротивление обмотки статора (ротора);

$r_1(r_2)$  – активное сопротивление фазы статора (ротора);

$p$  – число пар полюсов обмотки статора;

$J$  – момент инерции вращающихся частей электропривода;

$s$  – скольжение асинхронного электродвигателя;

$\sigma$  – коэффициент рассеяния,  $\sigma = 1 - k_s k_r$ .

Система дифференциальных уравнений (1) устойчиво решается на компьютере. Однако коэффициенты этих уравнений, которые в справочных данных по электродвигателям не приводятся, установить затруднительно. Можно предложить следующий способ их определения.

В установившемся режиме имеем

$$\frac{d\Psi_{x1}}{dt} = \frac{d\Psi_{y1}}{dt} = \frac{d\Psi_{x2}}{dt} = \frac{d\Psi_{y2}}{dt} = 0.$$

Из уравнений (1), в соответствии с [2], находим значения потокосцеплений и электромагнитный момент в виде

$$M = \frac{2}{3} \frac{p}{\omega_0} U_m^2 \frac{1-\sigma}{r_1} \frac{s \alpha'_s \alpha'_r}{\alpha'_s \alpha'_r \sigma - s + \alpha'_r + s \alpha'_s}, \quad (2)$$

а также составляющие тока статора

$$i_{x1} = \frac{U_m}{r_1} \alpha'_s \frac{\alpha'_s (\alpha_r'^2 \sigma^2 + s^2) + \alpha'_r k_r k_s s}{\alpha'_s \alpha'_r \sigma - s + \alpha'_r + s \alpha'_s},$$

$$i_{y1} = -\frac{U_m}{r_1} \alpha'_s \frac{\alpha_r'^2 \sigma + s^2}{\alpha'_s \alpha'_r \sigma - s + \alpha'_r + s \alpha'_s}. \quad (3)$$

Из исследования функции (2) на минимум находим критическое скольжение

$$s_k = \alpha'_r \sqrt{\frac{1 + \alpha_s'^2 \sigma^2}{1 + \alpha_s'^2}}. \quad (4)$$

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, т. е.  $r_1 = 0$ , то

$$\alpha'_s = \frac{r_1}{x_s \sigma} = 0; \quad s_k = \alpha'_r. \quad (5)$$

Известная из теории асинхронных двигателей [2] упрощенная формула Клосса для определения вращающего момента двигателя

$$M = \frac{2 M_k}{s/s_k + s_k/s} \quad (6)$$

также получена при условии  $r_1 = 0$ . Поэтому критическое скольжение, найденное по формуле Клосса при  $M = M_k$  и  $s = s_k$ , должно совпадать с формулой (5):

$$\alpha'_r = s_n \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right), \quad (7)$$

где  $s_n$  – номинальное скольжение;

$\lambda$  – перегрузочная способность двигателя, т. е. отношение критического момента к номинальному.

В уравнениях (1) принято, что вектор фазного напряжения статора совпадает с осью  $X$ . Поэтому синус угла между векторами фазного напряжения и тока равен отношению

$$\sin \varphi = \frac{i_{y1}}{\sqrt{2} I_1}, \quad (8)$$

где  $I_1$  – действующее значение тока фазы статора.

Принимаем далее:  $\varphi = \varphi_n$ . Мощность на валу двигателя  $P_{2н}$  и номинальный момент  $M_n$  выражаются так:

$$P_{2н} = 3 U_\phi I_{1н} \cos \varphi_n \eta_n; \quad M_n = \frac{P_{2н} p}{\omega_0 (1 - s_n)}$$

Подставляя  $i_{y1}$  из (3) в (8), после преобразований получаем

$$k_r k_s = \frac{1 - q^2}{1 + \frac{n_n}{n_0 \eta_n} q \operatorname{tg} \varphi_n}, \quad (9)$$

где  $q = \lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1}$ ;

$n_n$  – номинальная частота вращения ротора, об/мин;

$n_0$  – частота вращения поля статора, об/мин;

$\eta_n$  – номинальный коэффициент полезного действия двигателя.

Величины  $k_r$  и  $k_s$  обычно мало отличаются друг от друга, их значения находятся в пределах от 0,85 до 0,97. Ошибка при определении этих величин незначительно влияет на решение уравнений (1). Поэтому можно считать, что

$$k_r = k_s = \sqrt{k_r k_s}. \quad (10)$$

Ток статора при номинальном режиме

$$I_{H1}^2 = \frac{1}{2} (i_{x1}^2 + i_{y1}^2); \quad (11)$$

Используя равенство (3), после преобразований находим

$$\alpha'_s = \frac{\sigma - q}{\sigma^2 + q^2} \left( \frac{n_n}{n_0 \eta_n} - 1 \right). \quad (12)$$

Теперь из формулы (2) можно найти множитель перед скобкой в формуле для электромагнитного вращающего момента из системы (1):

$$\frac{3}{2} p \omega_0 \frac{k_r}{r_1} = \frac{M_n \omega_0^2}{2 U_\phi^2} \frac{(\alpha'_s \sigma - q)^2 + (\alpha'_s q)^2}{\alpha'_s k_s q}. \quad (13)$$

Точность определения коэффициентов системы (1) по формулам (7), (8), (12) и (13) зависит от точности каталожных данных двигателей. Кроме того, в полученных коэффициентах учитывается, что в электроприводе вместо электромагнитного момента двигателя используется вращающий момент на валу. В нашем случае механические потери оказываются отнесенными к потерям в статоре.

В процессе пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя коэффициенты системы (1) будут переменными, так как при скольжении больше критического на величину активного и индуктивного сопротивлений обмоток влияет вытеснение тока в стержнях обмотки ротора, а также насыщение магнитной цепи машины. При этом величины  $\alpha'_s$  и  $\alpha'_r$  изменяются в функции от скольжения. С достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять, что  $\alpha'_s$  и  $\alpha'_r$  линейно зависят от скольжения [2, 3], т. е. в уравнениях (1) надо считать

$$\alpha'_s = \alpha'_s + \alpha'_{s'i} - \alpha'_s \underline{s};$$

$$\alpha'_r = \alpha'_r + \alpha'_{r'i} - \alpha'_r \underline{s}.$$

Значения величин  $\alpha'_s$  и  $\alpha'_r$  в момент пуска можно получить из формул (2) и (10), учитывая, что при пуске скольжение равно единице, а пусковой момент и пусковой ток статора можно найти из каталожных данных. Тогда после преобразований получим

$$\alpha'_{si} = \frac{1}{\sqrt{A + \frac{2\sigma}{1-\sigma} B - \left(\frac{B}{1-\sigma} + 1\right)^2}}; \quad (14)$$

$$\alpha'_{rп} = \frac{B}{1-\sigma} \alpha'_{sп}. \quad (15)$$

Здесь  $A = \left(\frac{U_\phi}{I_{1п} r_1}\right)^2$ ;  $B = \frac{M_{п} \omega_0}{3 p I_{1п}^2 r_1}$ ;

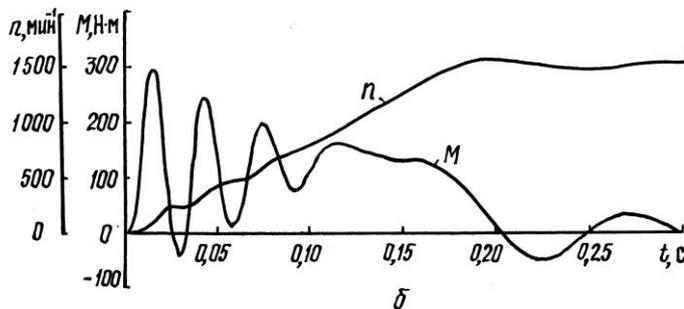
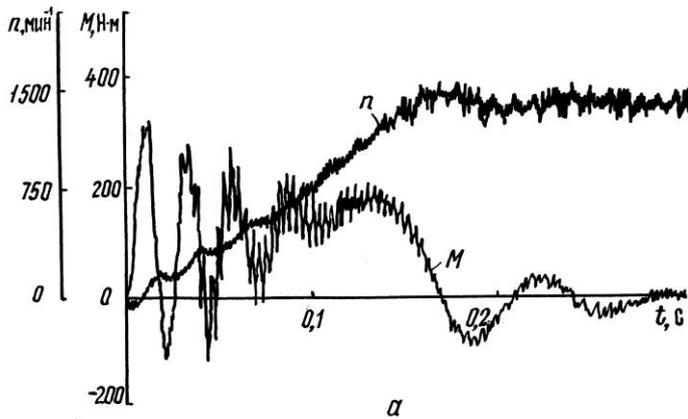
$I_{1п}$  – пусковой ток статора, А;

$M_{п}$  – пусковой момент, Н·м;

$U_\phi$  – фазное напряжение статора, В.

Величину  $r_1$  можно определить из формулы (13).

Для примера был рассчитан переходный процесс пуска асинхронного двигателя А62-4 на холостом ходу. Каталожные данные двигателя



$P_n = 14$  кВт;  $n_0 = 1500$  об/мин;  $n_n = 1550$  об/мин;  $\cos \varphi_n = 0,88$ ;  $\eta_n = 88,5$  %;  $M_k/M_n = 2$ ;  $M_n/M_n = 1,3$ ;  $I_n/I_n = 5,5$ ;  $U = 380$  В.

Коэффициенты системы (1), рассчитанные по формулам (7)–(9), (11)–(14):  $\alpha'_r = 0,1244$ ;  $\alpha'_s = 0,2859$ ;  $r_1 = 0,6\hat{\Pi}$ ;  $k_s = k_r = 0,962$ ;

$$\frac{3}{2} p \omega_0 \frac{k_r}{r_1} = 1510; \quad \alpha'_{s\dot{i}} = 0,5132; \quad \alpha'_{r\dot{i}} = 0,2582.$$

Результаты расчета приведены на рисунке.

На рис. а представлена осциллограмма пуска этого двигателя, взятая из работы [2]; на рис. б приведены графики переходного процесса, полученные по результатам интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) по программе, разработанной автором на кафедре промышленного транспорта АГТУ, по методу Рунге – Кутты с шагом интегрирования 0,0005 с. Как видим, рассчитанный переходный процесс хорошо совпадает с экспериментальным.

Предлагаемый метод вычисления параметров уравнений Парка – Горева дает возможность широко использовать эти уравнения при проектировании электропривода механизмов, работающих в тяжелых условиях с переменной нагрузкой и в условиях пуска.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буторин Н.Н., Ставинский Б.А. Использование короткозамкнутого асинхронного двигателя для привода резания лесопильной рамы // Лесн. журн. – 1974. – № 5 – С. 87 – 92. – (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Вольдек А.И. Электрические машины: Учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
3. Соколов М.М. и др. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.Б. Масандилов, В.А. Ладензон. – М.: Энергия, 1967. – 202 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 28.11.2000 г.

*N.N. Butorin*

#### **Transients in Asynchronous Electric Motor**

Parameters of differential equation system for investigating the transients are determined through the catalogue data of asynchronous electric motors.