

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ  
ПИТАЮЩЕМ НАПРЯЖЕНИИ

При исследовании частотно-регулируемых приводов с асинхронными двигателями (АД) и вентильными преобразователями частоты (ВПЧ), имеющими несинусоидальное выходное напряжение, может быть использована обобщенная схема замещения АД при несинусоидальном питающем напряжении [1]. Поскольку вид уравнений токов, потокосцеплений и других электрических величин зависит от формы кривой напряжения, то методику расчета покажем на примере ступенчатого напряжения, характерного для инвертора (рис. 1, а).

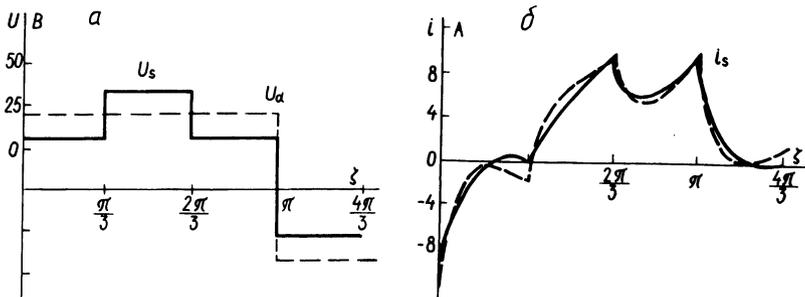


Рис. 1. Расчетные кривые при  $\phi = \text{const}$ ,  $f = 8,33$  Гц,  $S_y = 0,105$ : а — фазные напряжения ВПЧ и АД; б — фазный ток АД.

Асинхронный привод с ВПЧ может работать с нулевым проводом, связывающим нулевые точки источника и АД, и без него. По технико-экономическим показателям предпочтительнее работа без нулевого провода при отсутствии токов нулевой последовательности. Однако выражения для выходного напряжения ВПЧ записывать удобнее по отношению к нулевой точке источника. Решение уравнений при расчете токов в фазах АД также получается более простым при наличии нулевого провода между АД и ВПЧ. Известно [2], что результирующий вектор напряжения, тока, потокосцепления и других электрических величин не содержат нулевой последовательности. Поэтому целесообразно проводить расчет при условии, что нейтрали источника и АД связаны, а затем отыскивать фазные вели-

чины напряжений  $u_{s1}$ , токов  $i_{s1}$  при разорванных нейтралях в виде вещественной части соответствующего вектора:

$$\begin{aligned} u_{s1} &= \operatorname{Re}(\hat{u}_s) = u_{sx} = \frac{1}{3}(2u_{s10} - u_{s20} - u_{s30}) = \\ &= \frac{1}{3}(2u_{1u} - u_{2u} - u_{3u}); \end{aligned} \quad (1)$$

$$i_{s1} = \operatorname{Re}(\hat{i}_s) = i_{sx} = \frac{1}{3}(2i_{s10} - i_{s20} - i_{s30}), \quad (2)$$

где  $u_{s10}$ ,  $u_{s20}$ ,  $u_{s30}$ ,  $i_{s10}$ ,  $i_{s20}$ ,  $i_{s30}$  — соответственно напряжения и токи в трех фазах АД при соединенных нейтралях источника и АД;  $u_{1u}$ ,  $u_{2u}$ ,  $u_{3u}$  — фазные выходные напряжения источника (ВПЧ).

Следует иметь в виду, что токи  $i_{s10}$ ,  $i_{s20}$ ,  $i_{s30}$  содержат составляющую нулевой последовательности, которая определена с некоторой ошибкой, ибо схема замещения АД для этой последовательности иная. Но это не оказывает влияния на конечный результат, так как при составлении результирующего вектора составляющая нулевой последовательности из уравнений исключается. Такой подход значительно упрощает уравнения для токов и других величин.

При трехфазном источнике ступенчатого напряжения (рис. 1, а) имеем

$$u_{\phi.u} = K_{\phi} \cdot U_d, \quad (3)$$

где  $\phi = 1, 2, 3$  — индекс выходной фазы ВПЧ;  $U_d$  — наибольшее значение выходного напряжения относительно нулевой точки источника;  $K_{\phi}$  — переключающая функция:

$$K_{\phi} = \frac{\sin \left[ \xi - (\phi - 1) \frac{2\pi}{3} \right]}{\left| \sin \left[ \xi - (\phi - 1) \frac{2\pi}{3} \right] \right|}. \quad (4)$$

Здесь  $\xi = \omega_2 t = 2\pi f_2 t$ ,  $f_2$  — выходная частота ВПЧ.

Подставив (3) с учетом индекса фазы в (1), получим фазное напряжение в АД при отсутствии нулевого провода

$$U_{s1} = \frac{1}{3}(2K_1 - K_2 - K_3) U_d = \frac{1}{3} \Pi_1 U_d. \quad (5)$$

Как следует из [1], ток статора  $i_s$  АД

$$i_s = -i_r' + i_\mu, \quad (6)$$

где  $i_r'$  -- приведенный ток ротора;  $i_\mu$  -- синусоидальный ток намагничивания.

При питании АД ступенчатым напряжением для схемы замещения, показанной на рис. 1, б в [1], имеем дифференциальное уравнение для приведенного тока ротора первой фазы

$$u_{1u} + e_b' = i_{ro}' r_k + \omega_2 L_k \frac{di_{ro}'}{dt}, \quad (7)$$

где  $r_k$ ,  $L_k$  -- параметры расчетного контура схемы замещения [1]. Далее

$$e_b' = e_b + e_\partial = E_{mb} \sin(\xi - \varphi_0); \quad (8)$$

$$e_b = i_r' R_r' \frac{1-s_\nu}{s_\nu}, \quad e_\partial = - (i_\mu R_s + L_s \frac{di_\mu}{dt}); \quad (9)$$

$$\varphi_0 = \angle (\dot{U}_{s(1)}; \hat{\dot{E}}_{mb}).$$

Скольжение  $s_\nu$  зависит от принятого закона частотного регулирования АД. Например, при управлении АД по закону постоянства магнитного потока

$$s_\nu = s \cdot \nu, \quad (10)$$

где  $s$  -- скольжение на естественной механической характеристике АД.

Угол  $\varphi_0$  находится из векторной диаграммы, построенной для первой гармоники напряжения статора, или рассчитывается аналитически [3].

Принимая параметры  $r_k$  и  $L_k$  постоянными, уравнение (7) разбиваем на два уравнения

$$u_{1u} = i'_{r1} r_k + \omega_2 L_k \frac{di'_{r1}}{dt}; \quad (11)$$

$$e'_b = i'_{r2} r_k + \omega_2 L_k \frac{di'_{r1}}{dt}. \quad (12)$$

Решения этих уравнений соответственно имеют вид:

$$i'_{r1} = A_1 e^{-\xi \operatorname{ctg} \varphi_k} + K_1 I_d; \quad (13)$$

$$i'_{r2} = A_2 e^{-\xi \operatorname{ctg} \varphi_k} - I_{mb} \sin(\xi - \varphi_o - \varphi_k). \quad (14)$$

Здесь

$$I_d = \frac{U_d}{r_k}; \quad (15)$$

$$I_{mb} = \frac{E_{mb}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega_2 L_k)^2}}; \quad (16)$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = \frac{r_k}{\omega_2 L_k}. \quad (17)$$

Суммируя (13) и (14), найдем

$$i'_{ro} = A e^{-\xi \operatorname{ctg} \varphi_k} + K_1 I_d - I_{mb} \sin(\xi - \varphi_o - \varphi_k). \quad (18)$$

Постоянную  $A$  находим из условия симметрии III ряда для кривой тока, т.е.

$$i(\xi=0) = -i(\xi=\pi). \quad (19)$$

Используя (18) в (19), получим

$$A = -\frac{2I_d}{1 + a^3}. \quad (20)$$

Здесь  $a = e^{-\frac{\pi}{3} \operatorname{ctg} \varphi_k}$  . (21)

С учетом периодичности экспоненциальной составляющей и индекса фазы можно записать уравнения кривой тока ротора при  $0 \leq \xi < \infty$  для каждой из трех фаз в виде

$$i'_{r\phi_0} = K_\phi I_d \left[ 1 - \frac{2a^{\phi-1-3\epsilon_\phi}}{1+a^3} \cdot e^{-\xi \operatorname{ctg} \varphi_k} \right] - I_{mb} \sin \left[ \xi - \varphi_k - \varphi_0 - (\phi-1) \frac{2\pi}{3} \right] , \quad (22)$$

где  $\epsilon_\phi$  -- целая часть частного  $\epsilon_\phi = \frac{\xi}{\pi} + \frac{\phi-1}{3}$  .  
Уравнение тока ротора АД без нулевого провода найдем как вещественную часть результирующего вектора тока ротора:

$$-i'_r = V - We^{-\xi \operatorname{ctg} \varphi_k} - I_{mb} \sin (\xi - \varphi_k - \varphi_0) . \quad (23)$$

Здесь

$$V = \Pi_1 \cdot \frac{I_d}{3} ; \quad (24)$$

$$W = \frac{2I_d}{3(1+a^3)} \cdot (2K_1 a^{-3\epsilon_1} - K_2 a^{1-3\epsilon_2} - K_3 x a^{2-3\epsilon_3}) . \quad (25)$$

В соответствии с (6) и (25) получаем уравнение тока статора АД, работающего от ВПЧ без нулевого провода (рис. 1, б)

$$i_s = i_{sx} = i'_r + I_{m\mu} \sin (\xi - \varphi_\mu - \gamma) . \quad (26)$$

Здесь

$$I_{m\mu} = \frac{\sqrt{2 \cdot E_{s1} \cdot \gamma}}{\sqrt{r_\mu^2 + x_\mu^2}} ; \quad (27)$$

$$\gamma = \angle ( \dot{U}_{s(1)} ; \hat{\dot{E}}_{s(1)} ); \quad (28)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\mu} = \frac{x_{\mu}}{r_{\mu}}, \quad (29)$$

$E_{s(1)}$ ,  $x_{\mu}$ ,  $r_{\mu}$  — соответственно э.д.с., индуктивное и активное сопротивления намагничивающего контура по Т-образной схеме замещения [1]. Имея уравнения токов ротора и статора, можем найти их действующие значения:

$$I_r = \frac{2\sqrt{2}}{3} I_d \sqrt{F}; \quad I_s = \frac{2\sqrt{2}}{3} I_d \sqrt{G}; \quad (30)$$

$$F = 1 - \frac{3}{2\pi} \frac{1-a^2}{1-a+a^2} \operatorname{tg} \varphi_k + \frac{9}{16} g_1^2 - \frac{9}{2\pi} g_1 \cos \varphi_0 \cos \varphi_k;$$

$$G = F + \frac{9}{16} g_2^2 + \frac{9}{2\pi} g_2 \cos \varphi_k \cos (\varphi_k - \varphi_{\mu} - \gamma) -$$

$$- \frac{9}{8} g_1 g_2 \cos (\varphi_k + \varphi_0 - \varphi_{\mu} - \gamma);$$

$$g_1 = \frac{I_{mb}}{I_d}, \quad g_2 = \frac{I_{m\mu}}{I_d}.$$

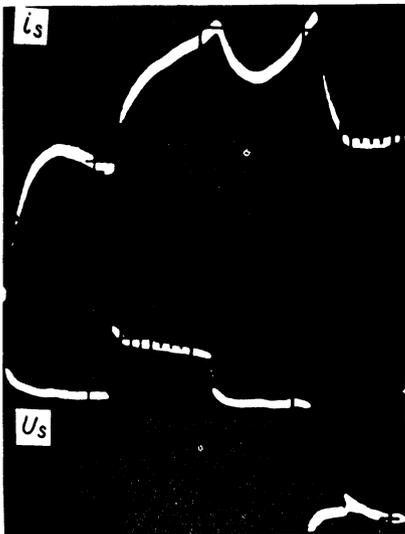


Рис. 2. Оциллограммы фазных тока и напряжения АД в расчетном режиме.

Используя уравнения для мгновенных и действующих значений тока статора и ротора АД, можно определить основные энергетические показатели привода: коэффициент искажений то-

ков, коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, а также колебания электромагнитного момента и скорости [2]. На рис. 1, б приведена кривая тока статора АД типа АО2-42-6, 4 кВт, 960 об/мин, рассчитанная по (26) при  $\Phi = \text{const}$ ,  $s_2 = 0,105$ ,  $f_2 = 8,33$  Гц. Сопоставление этой кривой с опытными данными (пунктирная кривая на рис. 1, б), полученными при осциллографировании тока и напряжения при питании АД от инвертора напряжения (рис. 2), подтверждает правильность предлагаемой методики расчета.

### В ы в о д

Изложенная методика позволяет рассчитать токи статора и ротора АД при несинусоидальном питающем напряжении без применения метода гармонического анализа.

### Л и т е р а т у р а

1. Фираго Б.И., Сидоров В.Г. Схема замещения АД для расчета электромагнитных процессов при несинусоидальном питающем напряжении (см. настоящий сборник). 2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М., 1963. 3. Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А. Тирис-торные циклоконверторы. Минск, 1973.

В.П. Беляев, О.П. Ильин, Ю.Н. Петренко

### ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТА С ЧАСТОТНОУПРАВЛЯЕМЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Важным вопросом при проектировании электроприводов лифтов является формирование скоростной диаграммы с соответствующими ограничениями величин ускорения и рывка в переходных процессах. В установках с нерегулируемым электроприводом такое формирование достигается путем создания специальных лифтовых асинхронных двигателей с соответствующей механической характеристикой и увеличением общего момента инерции установки. При этом удовлетворительных результатов удается достичь для лифтов со скоростью движения кабины не более 1 м/с. Однако даже в этом случае требование точ-