

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ  
РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ  
НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ ПИТАЮЩЕМ НАПРЯЖЕНИИ

В работе рассматривается обобщенная схема замещения асинхронного двигателя (АД), применимая для расчета электромагнитных процессов при несинусоидальном питающем напряжении как в режиме непрерывного, так и в режиме прерывистого тока независимо от вида преобразователя частоты.

Запишем уравнения равновесия напряжений для первой фазы статора и приведенного ротора трехфазного двухполосного АД:

$$u_{s1} = i_{s1} R_s + L_s \frac{di_{s1}}{dt} + \frac{3}{2} l_m \frac{di_{s1}}{dt} + l_m \sum_{\phi=1}^3 x$$

$$x \left\{ \cos \left[ \theta + (\phi - 1) \frac{2\pi}{3} \right] \frac{di'_{r\phi}}{dt} - \omega_r i'_{r\phi} \sin x \right.$$

$$\left. x \left[ \theta + (\phi - 1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}; \quad (1)$$

$$0 = i'_{r1} R'_r + L'_r \frac{di'_{r1}}{dt} + \frac{3}{2} l_m \frac{di'_{r1}}{dt} + l_m \sum_{\phi=1}^3 x$$

$$x \left\{ \cos \left[ \theta + (\phi - 1) \frac{2\pi}{3} \right] \frac{di_{s\phi}}{dt} - \omega_r i_{s\phi} \right.$$

$$\left. x \sin \left[ \theta + (\phi - 1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\phi = 1, 2, 3$  — номер фазы АД;  $L_s, L'_r$  — индуктивности рассеивания обмоток статора и ротора;  $R_s, R'_r$  — активные сопротивления статора и ротора;  $l_m$  — максимальное значение взаимной индуктивности обмоток фазы статора и ротора;  $\omega_r$  — скорость вращения ротора;  $\theta$  — угол поворота ротора;  $\theta = \omega_r t$ ;  $u_{s1}$  — напряжение, приложенное к первой фазе статора АД;  $i_{s1}, i'_{r1}$  — соответственно токи первой фазы статора и ротора.

Несинусоидальное напряжение  $u_{s1}$  питания АД можно представить в виде суммы первой гармоники  $u_{s(1)}$  и высших гармоник  $u_{s(u)}$  (напряжения искажений)

$$u_{s1} = u_{s(1)} + u_{s(u)}. \quad (3)$$

Для первой гармоники напряжения АД имеет обычную Т-образную схему замещения [1], для которой получаем уравнение в векторной форме

$$\dot{U}_{s(1)} = \dot{I}_{s(1)} \left( R_s + j \frac{X_s}{\nu} \right) - \dot{E}_{s(1)}, \quad (4)$$

где  $X_s$  — индуктивное сопротивление рассеивания статора АД на номинальной частоте  $\omega_1$ ,  $X_s = \omega_1 L_s$ ;  $\nu$  — отношение номинальной частоты к выходной частоте преобразователя частоты,  $\nu = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_1}{f_2}$ ,  $E_{s(1)}$  — ЭДС намагничивающего контура Т-образной схемы замещения АД.

Скорость ротора АД определяется в значительной степени частотой первой гармоники питающего напряжения. Поэтому по отношению к полю высших гармоник он вращается со скольжением, близким к единице, т.е. для напряжения искажений АД можно рассматривать находящимся в режиме короткого замыкания [1]. Таким образом уравнения электрического равновесия при питании АД напряжением искажений могут быть получены из (1) и (2), приняв в них  $\omega_r = 0$  и  $\theta = \omega_r t = 0$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s(u)} = R_s i_{s(u)} + L_s \frac{di_{s(u)}}{dt} + L_m \frac{di_{s(u)}}{dt} + L_m \frac{di'_r(u)}{dt}; \quad (5) \\ 0 = R'_r i'_r(u) + L'_r \frac{di'_r(u)}{dt} + L_m \frac{di'_r(u)}{dt} + L_m \frac{di_{s(u)}}{dt}, \quad (6) \end{array} \right.$$

где  $L_m$  — эквивалентная взаимная индуктивность от действия всех фаз статора и ротора,  $L_m = \frac{3}{2} l_m$ ;  $i_{s(u)}$ ,  $i'_r(u)$  —

токи искажения фазы статора и ротора соответственно.

Уравнениям (5) — (6) соответствует схема замещения, показанная на рис. 1, а. В режиме короткого замыкания магнитный поток весьма мал, им можно пренебречь, приняв на-

магнетирующий ток от высших гармоник напряжения  $i_{\mu(u)} = 0$ . В результате приходим к выводу, что основной магнитный поток АД создается первой гармоникой напряжения, следовательно, основной поток и намагничивающий ток будут синусоидальными даже при несинусоидальном питающем напряжении. Токи искажений проходят по цепи статора и ротора, ми-

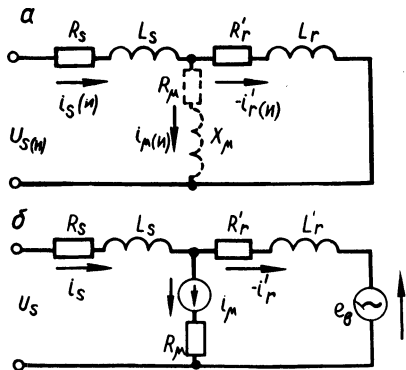


Рис. 1. Схемы замещения АД при несинусоидальном питающем напряжении.

нуя намагничивающий контур. Намагничивающий ток определяется из Т-образной схемы замещения для первой гармоники напряжения в предположении, что полное сопротивление намагничивающего контура пропорционально частоте питающего напряжения [4]:

$$i_{m\mu} = i_{\mu(1)} = I_{m\mu(1)} \sin \left( \frac{\omega_1 t}{\nu} - \delta - \varphi_{\mu} \right). \quad (7)$$

Здесь

$$I_{m\mu(1)} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{s(1)} \cdot \nu}{\sqrt{R_{\mu}^2 + X_{\mu}^2}}; \quad (8)$$

$$\varphi_{\mu} = \arctg \frac{X_{\mu}}{R_{\mu}}; \quad (9)$$

$$\delta = \angle \left( \dot{U}_{s(1)}; \widehat{-\dot{E}_{s(1)}} \right), \quad (10)$$

где  $R_{\mu}, X_{\mu}$  — активное и индуктивное сопротивления контура намагничивания при номинальной частоте;  $I_{m\mu}(1)$  — ток намагничивания от напряжения первой гармоники.

Известно, что при несинусоидальном питающем напряжении средний вращающийся момент определяется первой гармоникой напряжения [1-4], или преобразованной в механическую электромагнитной мощностью. Поэтому при постоянной средней скорости ротора ЭДС вращения, характеризующая электро-механическое преобразование энергии, будет равна [2]

$$e_B = i_r^1 R_r \frac{1-s}{s}, \quad (11)$$

где  $s$  — скольжение ротора АД в поле первой гармоники;  $i_r^1(1)$  — ток первой гармоники ротора.

На основании уравнений (9) — (11) объединим схемы замещения АД для первой и высших гармоник напряжения, с учетом синусоидальности намагничивающего тока и наличия ЭДС вращения в одну обобщенную схему (рис. 1,б). Включение в намагничивающий контур источника синусоидального тока  $i_{\mu}$  исключает протекание в этом контуре токов от напряжения искажений. Предлагаемая схема замещения получена при некоторых допущениях, основным из которых является утверждение о синусоидальности основного потока. Обоснованность этого утверждения может быть подтверждена экспериментально. Однако непосредственное наблюдение потока по кривой э.д.с. в различного рода пробных обмотках, встраиваемых в АД, затруднено из-за влияния полей рассеивания. Сигнал, пропорциональный основному потоку, может быть получен из решения уравнения электрического равновесия (1), записанного в виде

$$u_{s1} = i_{s1} R_s + L_s \frac{di_{s1}}{dt} + \frac{d\psi}{dt}. \quad (12)$$

Для получения достоверной картины решение целесообразно проводить на АВМ методом физико-математического моделирования, когда в схему набора решения подаются реальные кривые  $u_{s1}$  и  $i_{s1}$  с АД. Кривая потока, полученная в результате решения уравнения (12), весьма близка к синусоиде (рис. 2, а). Кроме того, если на вращающемся АД отсоединить одну из статорных обмоток от источника несинусоидального напряже-

ния, в этой обмотке можно обнаружить синусоидальный сигнал (рис. 2, б). Этот сигнал наводится основным магнитным потоком, значит и поток будет изменяться во времени синусоидально. Данные экспериментальной проверки указывают, таким образом, на то, что основной магнитный поток создается первой гармоникой напряжения, а высшие гармоники влияния на поток не оказывают, т.е. намагничивающий ток в значительной степени синусоидален.

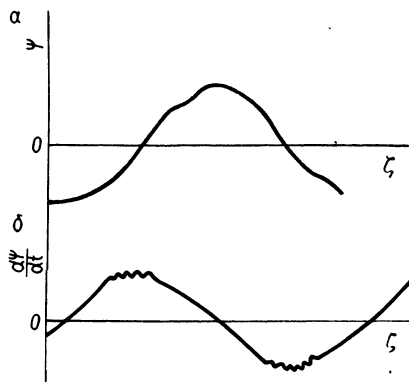


Рис. 2. Осциллограммы по данным экспериментального исследования: а—кривая главного потока из решения уравнения статора на АВМ; б—кривая э.д.с. от главного потока в разомкнутой статорной обмотке АД.

Предлагаемая схема замещения позволяет, с одной стороны, дать достаточно простое качественное объяснение некоторым явлениям в АД при несинусоидальном напряжении, а с другой—рассчитать кривые токов ротора и статора, мгновенные значения электромагнитного момента и скорости, не прибегая к методам гармонического анализа. При постоянных параметрах схемы замещения АД, показанной на рис. 1, б, расчет токов статора и ротора можно производить методом суперпозиции. Для расчета тока ротора составим уравнение равновесия напряжений схемы на рис. 1, б, обозначив  $i_2 = -i_r'$  :

$$i_{\mu} R_s + L_s \frac{di_{\mu}}{dt} + R_s i_2 + L_s \frac{di_2}{dt} + L_r' \frac{di_2}{dt} + R_r' i_2 = u_{s1} + e_B. \quad (13)$$

Поскольку  $i_{\mu}$  — синусоидальный ток, то можно ввести в (13) дополнительную синусоидальную ЭДС

$$e_g = - ( i_\mu R_s + L_s \frac{di_\mu}{dt} ) . \quad (14)$$

Теперь уравнение (13) принимает вид

$$R_k i_r + L_k \frac{di_2}{dt} = u_{s1} + e_b + e_g ; \quad (15)$$

$$R_k = R_s + R_r' ; L_k = L_s + L_r' . \quad (16)$$

Две синусоидальные ЭДС объединяем в одну

$$e_b' = e_b + e_g . \quad (17)$$

Ток ротора определяется из (15) методом наложения от действия несинусоидального напряжения  $u_{s1}$  и синусоидальной ЭДС  $e_b'$  на контур с параметрами  $R_k, L_k$ . Ток статора равен

$$i_s = -i_r' + i_\mu = i_2 + i_\mu . \quad (18)$$

Исходя из предлагаемой схемы замещения АД и вытекающей из нее методики могут быть получены уравнения периодических кривых токов, потокосцеплений, электромагнитного момента и определены энергетические показатели электропривода.

#### В ы в о д ы

Предложена и обоснована схема замещения АД для расчета электромагнитных процессов при несинусоидальном питающем напряжении.

Приведена методика расчета токов ротора и статора по данной схеме замещения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Грузов В.Л., Сабинин Ю.А. Асинхронные маломощные приводы со статическими преобразователями. Л., 1970. 2. Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А. Тиристорные циклоконверторы. Минск, 1973. 3. Фираго Б.И., Павлович С.Н. Выходное напряжение и ток преобразователя частоты с непосредственной связью при работе на асинхронный двигатель. — "Изв. вузов. Энергетика", 1972, № 3. 4. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М., 1966.