

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСИРОВАННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Мишин В.И., д.т.н., проф., Козырский В.В., д.т.н., проф., Чуенко Р.Н., к.т.н., доц.  
 Национальный аграрный университет  
 Украина, 03041, Киев, ул. Героев обороны 15, НАУ, факультет энергетики и автоматики  
 тел. (044) 527-61-81

*Наведена методика розрахунку характеристик компенсованого асинхронного двигуна з урахуванням зміни під час його роботи опорного кола намагнічування.*

*Изложена методика расчета характеристик компенсированного асинхронного двигателя с учетом изменения во время его работы сопротивления намагничивающего контура.*

Компенсированным называем асинхронный двигатель с внутренней емкостной компенсацией реактивной мощности, которая, в отличие от внешней компенсации, оказывает влияние на физические процессы, характеристики и технико-экономические показатели самого двигателя по сравнению с его базовым серийным прототипом.

Принцип внутренней емкостной компенсации основан на разделении фазы обмотки статора асинхронного двигателя на две части, одна из которых при последовательном соединении шунтируется конденсатором [3], а при параллельном исходном положении они включаются по автотрансформаторной схеме на электрическую емкость (рис. 1, а, б) [3, 4]. В обоих случаях на емкостях имеет место фиксированное рабочее напряжение, чем обеспечивается эффективное использование конденсаторов, исключаются нежелательные резонансные явления и влияние на гармонический спектр кривых тока, напряжения.

При этом базовая схема обмотки статора остается неизменной. В общем случае обмотка может быть разделена на любое число различных частей с компенсацией реактивной мощности в отдельных частях, но из условий технологической простоты ее удобно разделить на две части без изменения основной схемы. За счет емкости в цепи одной из полуобмоток статора происходит фазовый сдвиг  $\alpha$  их токов во времени и, соответственно, пространственный сдвиг волн магнитодвижущих сил (МДС), создаваемых полуобмотками. Для пространственного совмещения волн МДС, обеспечивающего минимум реактивного намагничивающего тока, необходимо пространственно сместить между собой полуобмотки на угол  $\theta$  так, чтобы соблюдалось условие  $\alpha + \theta = 0$  [3, 4].

При  $\cos\varphi_n = 0,8-0,9$  ряда базовых асинхронных двигателей наиболее благоприятный режим работы компенсированных асинхронных машин имеет место при  $\alpha = \pm 30^\circ$ ,  $\theta = \mp 30^\circ$ .

Технологически просто этого можно достичь, не изменяя схему базовой обмотки статора, разделив ее  $60^\circ$ -ю фазную зону на две равные части с пространственным сдвигом между ними  $\theta = 30^\circ$ .

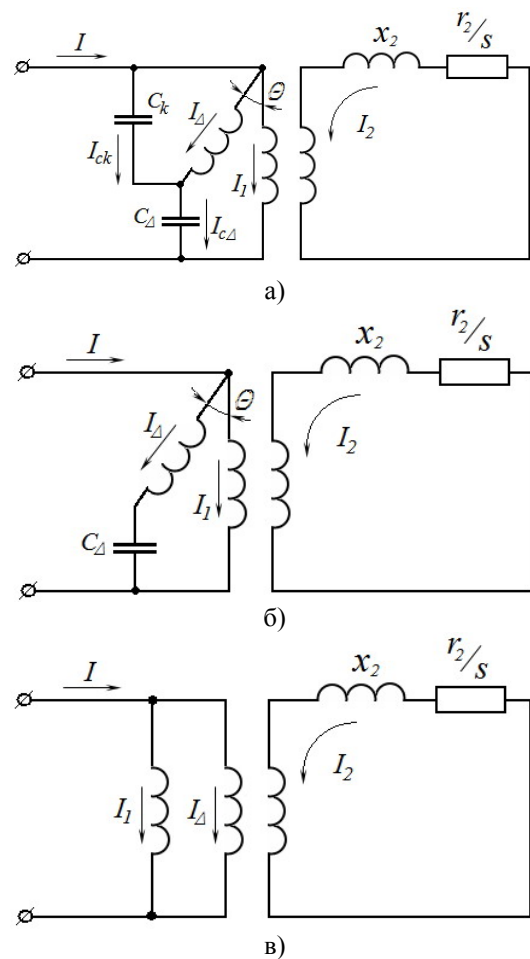


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы асинхронного двигателя с внутренней емкостной компенсацией реактивной мощности:  
 а – ОКАД, б – КАД, в – АД

В обобщенном компенсированном двигателе (ОКАД) (рис. 1,а) сочетаются два вида внутренней емкостной компенсации: с помощью емкости  $C_d$  на выходе автотрансформатора и шунтирование емкости  $C_k$  вторичной обмотки автотрансформатора. Такое сочетание емкостей дает возможность оказывать максимальное воздействие на двигатель и может считаться обобщенным.

При этом обе полуобмотки статора ОКАД являются энергонесущими, но одна из них (с емкостью)

становится еще и компенсационной по реактивной мощности. Электромагнитная связь ее тока с другими обмотками двигателя (токами статора и ротора) приводит к перераспределению мощностей между ними, повышению  $\cos\phi$  от естественного до 1 и даже с переходом в емкостную сторону, изменению пусковых и рабочих токов и моментов, уменьшению потерь электроэнергии.

Сущность методики расчета характеристик компенсированных асинхронных двигателей заключается в составлении уравнений электрического равновесия напряжений цепей статора и ротора, число которых равно числу независимых контуров.

Составление уравнений электрического равновесия цепей статора и ротора начинаем с рассмотрения ОКАД (рис. 1,а). При этом, учитывая сопротивления рассеяния между параллельными ветвями одной фазы  $x_1 \cos\theta$ , получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 + jx_1 \dot{I}_\Delta \cos\theta, \\ \dot{U} &= -\dot{E}_\Delta + \dot{I}_\Delta Z_\Delta + jx_1 \dot{I}_1 \cos\theta + \dot{U}_{c\Delta}, \\ \dot{U}_\Delta &= -\dot{E}_\Delta + \dot{I}_\Delta Z_\Delta + jx_1 \dot{I}_1 \cos\theta = -jx_{ck} \dot{I}_{ck}, \\ 0 &= -\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \left( \frac{r_2}{s} + jx_2 \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где ЭДС первичной и вторичной цепей:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta}) = -jx_m \dot{I}_0;$$

ЭДС компенсационной обмотки:

$$\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\theta} = -jx_m \left[ (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) e^{j\theta} + \dot{I}_\Delta \right];$$

напряжение на конденсаторе  $C_\Delta$  и его ток:

$$\dot{U}_{c\Delta} = \dot{U} - \dot{U}_\Delta \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1 = -jx_{c\Delta} \dot{I}_{c\Delta}, \quad \dot{I}_{c\Delta} = \dot{I}_\Delta + \dot{I}_{ck}.$$

Выражаем токи  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_{ck}$  из уравнений системы

(1):

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2} = -j \frac{x_m}{Z_{2m}} (\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta}); \\ \dot{I}_{ck} &= \frac{\dot{I}_1 (jZ_s e^{j\theta} - x_1 \cos\theta) + j\dot{I}_\Delta (Z_1 + Z_s)}{x_{ck}}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где} \quad Z_{2m} = \frac{r_2}{s} + jx_2 + jx_m, \quad Z_s = jx_m \frac{Z_2}{Z_{2m}}. \quad (3)$$

Число уравнений сводится до двух:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{I}_1 (Z_1 + Z_s) + \dot{I}_\Delta (jx_1 \cos\theta + Z_s e^{-j\theta}) \\ \dot{U} &= \dot{I}_1 \left( jx_1 \cos\theta + Z_s e^{-j\theta} \right) \left( 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}} \right) + \\ &+ \dot{I}_\Delta \left[ (Z_1 + Z_s) \left( 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}} \right) - jx_{c\Delta} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{или} \quad a\dot{U} = b\dot{I}_1 + c\dot{I}_\Delta, \quad d\dot{U} = e\dot{I}_1 + f\dot{I}_\Delta. \quad (5)$$

Выражения для коэффициентов системы (5) имеют вид

$$a = d = 1, \quad b = Z_1 + Z_s, \quad c = jx_1 \cos\theta + Z_s e^{-j\theta};$$

$$e = \left( jx_1 \cos\theta + Z_s e^{j\theta} \right) \cdot \left( 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}} \right);$$

$$f = (Z_1 + Z_s) \cdot \left( 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}} \right) - jx_{c\Delta};$$

Отсюда выражения для токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_\Delta$ :

$$\dot{I}_1 = \gamma \dot{U}; \quad \dot{I}_\Delta = \Delta \dot{U}, \quad (6)$$

$$\text{где} \quad \gamma = \frac{af - cd}{bf - ce}, \quad \Delta = \frac{bd - ae}{bf - ce}.$$

После определения токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_\Delta$  находим токи  $\dot{I}_2$ ,  $\dot{I}_{ck}$ ,  $\dot{I}_\Delta$  и общий ток двигателя  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta + \dot{I}_{ck}$ .

Даже при постоянном напряжении источника питания двигателя с изменением скольжения изменяются его токи и падения напряжения, что приводит к изменению ЭДС обмоток. Приняв за расчетную величину ЭДС основной обмотки ОКАД  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$  и нелинейную зависимость ее от сопротивления  $x_m$  (главного реактивного сопротивления) намагничивающего контура, которая в соответствии с кривой намагничивания асинхронного двигателя выражается как  $E_1 = f(x_m)$ , из расчетных уравнений можно определить и другую функциональную зависимость между ними. Для этого уравнения системы (1) сводятся к ее первым двум уравнениям, где токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_\Delta$  выражаются через напряжение  $\dot{U}$  и ЭДС  $\dot{E}_1$ . При этом  $\dot{E}_1$  не раскрывается через совокупность токов, а принимается как самостоятельный аргумент системы, зависящий от нагрузки и напряжения  $\dot{U}$ .

Использование непосредственно кривой намагничивания как зависимости ЭДС  $E$  ферромагнитного устройства от намагничивающего тока  $I_0$  (рис. 2,а) несколько затруднено необходимостью предварительного определения сопротивления  $x_m$  намагничивающего контура, равного  $x_m = \frac{E}{I_0}$ . Затем из совокупности графиков зависимостей  $E = f(I_0)$  и  $x_m = \varphi(I_0)$  по определенному значению  $I_0$  находят соответствующую ему величину ЭДС при одинаковых токах  $I_0$  для  $E$  и  $x_m$ .

Задача определения ЭДС по известному значению  $x_m$  без участия намагничивающего тока  $I_0$  упрощается при наличии непосредственной зависимости  $E = f(x_m)$ . Так при использовании данных типовой кривой намагничивания асинхронных двигателей серий 4А и АИР мощностью 0,55-11 кВт [2], построена кривая  $E = f(x_m)$  (рис. 2,б). Наличие ряда линейных участков в данной кривой дает возможность относительно просто использовать кусочно-линейную аппроксимацию типа  $E = a_x + b_x x_m$  в определенных диапазонах изменения  $E$  и  $x_m$ .

Выразив из третьего уравнения системы (1) ток  $\dot{I}_{ck}$

$$\dot{I}_{ck} = - \frac{j\dot{E}_1 e^{j\theta} + j\dot{I}_\Delta Z_1 - \dot{I}_1 x_1 \cos\theta}{x_{ck}}$$

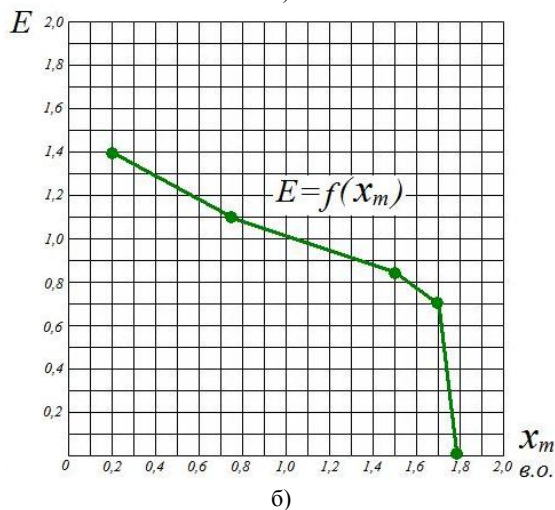
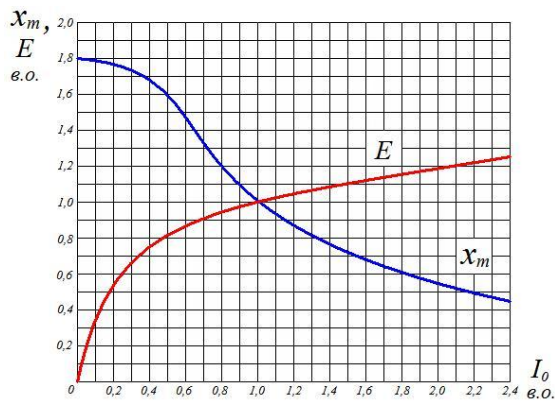


Рис. 2. Графики зависимостей ЭДС двигателя от намагничивающего тока и сопротивления намагничивающего контура

и подставив его в выражение тока  $\dot{I}_{c\Delta} = \dot{I}_{\Delta} + \dot{I}_{ck}$  второго выражения при  $\dot{U}_{c\Delta} = -jx_{c\Delta}\dot{I}_{c\Delta}$ , получаем:

$$\dot{U} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 + j\dot{I}_{\Delta} x_1 \cos \theta$$

$$\dot{U} = \left(1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}}\right) \left(-\dot{E}_1 e^{j\theta} + j\dot{I}_1 x_1 \cos \theta + \dot{I}_{\Delta} Z_1\right) - j\dot{I}_{\Delta} x_{c\Delta}, \quad (7)$$

что при  $\dot{I}_1 = \frac{1}{Z_1}(\dot{U} + \dot{E}_1 - j\dot{I}_{\Delta} x_1 \cos \theta)$  и  $k_c = 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}}$

приводит к следующему выражению:

$$\dot{I}_{\Delta} = \frac{\dot{U} \left(\frac{Z_1}{k_c} - jx_1 \cos \theta\right) + \dot{E}_1 (Z_1 e^{j\theta} - jx_1 \cos \theta)}{Z_1^2 + x_1^2 \cos^2 \theta - jx_{c\Delta} \frac{Z_1}{k_c}}. \quad (8)$$

или

$$\dot{I}_{\Delta} = a_{\Delta} \dot{U} + b_{\Delta} \dot{E}_1,$$

где

$$a_{\Delta} = \frac{\frac{Z_1}{k_c} - jx_1 \cos \theta}{Z_1^2 + x_1^2 \cos^2 \theta - jx_{c\Delta} \frac{Z_1}{k_c}},$$

$$b_{\Delta} = \frac{Z_1 e^{j\theta} - jx_1 \cos \theta}{Z_1^2 + x_1^2 \cos^2 \theta - jx_{c\Delta} \frac{Z_1}{k_c}}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U} - \dot{E}_1}{Z_1} - j \frac{x_1}{Z_1} \cos \theta (a_{\Delta} \dot{U} + b_{\Delta} \dot{E}_1) = c_1 \dot{U} + d_1 \dot{E}_1,$$

$$\text{где } c_1 = \frac{1 - ja_{\Delta} x_1 \cos \theta}{Z_1}, \quad d_1 = \frac{1 - jb_{\Delta} x_1 \cos \theta}{Z_1}.$$

Токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_{\Delta}$ , найденные по формулам (6) и (8) в общем виде должны быть соответственно одинаковы, т.е. выражения

$$\begin{aligned} \gamma \dot{U} &= c_1 \dot{U} + d_1 \dot{E}_1 \\ \Delta \dot{U} &= a_{\Delta} \dot{U} + b_{\Delta} \dot{E}_1 \end{aligned} \quad (9)$$

должны удовлетворять необходимым значениям  $\dot{U}$  и  $\dot{E}_1$ . Выражая из кривой намагничивания на определенном линейном участке ЭДС  $E_1 = a_x + b_x x_m$  и подставляя комплекс  $\dot{E}_1$  равный модулю  $E_1 = \dot{E}_1$  из системы (9), можно найти  $x_m$  и  $\dot{U}$ , соответствующие данному режиму работы асинхронного двигателя.

В случае необходимости рассчитать характеристики более простых модификаций ОКАД – компенсированного (КАД) (рис. 1,б) или базового асинхронного двигателя с двумя параллельными ветвями (АД) (рис. 1, в) следует задать соответствующие значения емкостных сопротивлений  $x_{c\Delta}$  и  $x_{ck}$ : для КАД –  $x_{c\Delta} = \text{var}$ ,  $x_{ck} = \infty$ , а для АД –  $x_{c\Delta} = \theta$ ,  $x_{ck} = \infty$ .

По результатам расчетов строят и анализируют необходимые характеристики двигателя, причем для базового АД расчеты проводят при номинальном напряжении и заданном отклонении от него, а для КАД, кроме того, при изменении в заданном диапазоне емкостных сопротивлений  $x_{c\Delta}$  и  $x_{ck}$ , а также величины и знака угла  $\theta = 0, \pm 30^\circ, \dots$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф и др. / – М.: Энергоиздат, 1982, – 504 с.
3. Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулируемыми характеристиками. Вісник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ "ХПИ". – 2001. – №17. – С. 110-112.
4. Мішин В.І., Кафтан Б.М. Спосіб поліпшення пускорегулювальних характеристик асинхронного двигуна. Електрифікація та автоматизація с.г. – 2003. – №1. – С. 31-35.

Поступила 03.09.2007