

УДК 621.313.333.1

Эпштейн Исаак Израилевич, д-р техн. наук, проф.
Корпорация "ХЭЗ-Элетекс-С"

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье приведено техническое обоснование формул, по которым рассчитываются параметры асинхронных двигателей по их табличным данным.

Ключевые слова: двигатель, асинхронный, параметры.

Эпштейн Исаак Израилевич, д-р техн. наук, проф.
Корпорация "ХЭЗ-Элетекс-С"

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АСІНХРОННОГО ДВИГУНА

У статті приведено обґрунтування формул, по яких розраховуються параметри асинхронних двигунів за їх табличними даними.

Ключові слова: двигун, асинхронний, параметри.

Epstein Isaak Izrailevich, Dr Eng. Sc., Prof.
Corporation "KHEZ-ELETEKS-S"

A CALCULATION OVER OF PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS ENGINE

In the article is brought technical ground of formulas on that the parameters of asynchronous engines settle accounts from their tabular data.

Keywords: engine asynchronous, parameters.

Постановка задачи

Для целей проектирования современного электропривода на базе асинхронных двигателей, в частности, расчета установившихся режимов для различных применений, необходимо знание внутренних параметров двигателя в отсутствие расчетного формуляра.

В наличии имеется только табличка с номинальными данными. Ставится задача по номинальным данным определить параметры двигателя, необходимые для расчетов и проектирования, и получить простые, но обоснованные формулы для расчета режима работы двигателя.

Расчетные соотношения. Круговая диаграмма

Для короткозамкнутого асинхронного двигателя общеизвестна Т-образная схема замещения, показанная на рис. 1

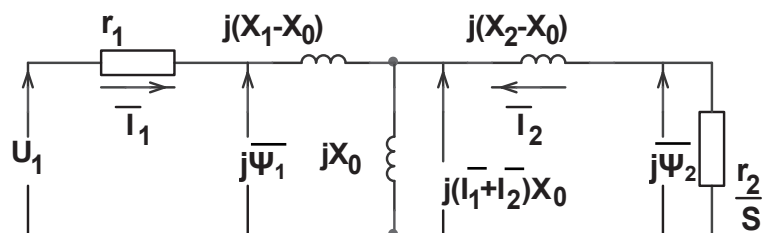


Рис. 1. Т-образная схема замещения

Здесь U_1 – напряжение статора;

X_1, X_2 – полные индуктивные сопротивления статора и ротора;

r_1, r_2 – сопротивления обмоток статора и ротора;

X_0 – индуктивное сопротивление взаимной индукции статора и ротора;

S – скольжение двигателя.

Параметры и переменные ротора приведены к обмотке статора.

Вместо тока \bar{I}_2 удобно использовать переменную $-\bar{I}_2$, которая является составляющей тока статора, компенсирующей роторный ток.

Сверткой внутреннего контура на рис. 1, получаем следующую схему замещения двигателя, в которой фигурирует только ток \bar{I}_1 , а также новые параметры, вытекающие из параметров перечисленных выше.

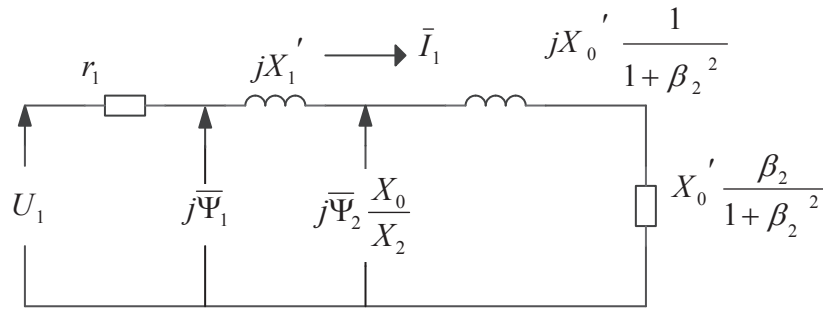


Рис. 2. Модифицированная схема замещения двигателя

$$\beta_2 = S \frac{X_2}{r_2}, \quad X_0' = \frac{X_0^2}{X_2}, \quad X_1' = X_1 - X_0' \tag{1}$$

Для упрощения математических выражений при сохранении практически такого же качества описания полагаем, что $r_1 = 0$.

Параметры и переменные в электрических машинах, как правило, выражаются в относительных единицах.

Базовые величины: $U_\delta = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3}}, \quad I_\delta = I_n, \quad Z_\delta = \frac{U_\delta}{I_\delta}, \quad M_\delta = 975 \frac{3U_\delta I_\delta}{n_c}$.

С учетом изложенного ток \bar{I}_1 равен:

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{j \left(X_1' + X_0' \frac{1}{1 + \beta_2} \right) + X_0' \frac{\beta_2}{1 + \beta_2}} = \frac{X_0' \beta_2 - j(X_1 + X_1' \beta_2^2)}{X_1^2 + X_1'^2 \beta_2^2} \tag{2}$$

При $\beta_2 = 0$ (идеальный холостой ход) и $\beta_2 = \infty$ (режим идеального короткого замыкания) справедливы следующие соотношения:

$$\bar{I}_{xx} = -\frac{j}{X_1}, \quad \bar{I}_{кз} = -\frac{j}{X_1'}, \quad \frac{\bar{I}_{xx} + \bar{I}_{кз}}{2} = -j \frac{X_1 + X_1'}{2X_1X_1'}, \quad \frac{\bar{I}_{xx} - \bar{I}_{кз}}{2} = -j \frac{X_1 - X_1'}{2X_1X_1'}$$

Перепишем выражение для \bar{I}_1 (2), прибавляя и вычитая $-j \frac{X_1 + X_1'}{2X_1X_1'}$:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= -j \frac{X_1 + X_1'}{2X_1X_1'} + \left[\frac{X_0' \beta_2 - j(X_1 + X_1' \beta_2^2)}{X_1^2 + X_1'^2 \beta_2^2} + j \frac{X_1 + X_1'}{2X_1X_1'} \right] = \\ &= -j \frac{X_1 + X_1'}{2X_1X_1'} + \frac{X_1 - X_1'}{2X_1X_1'} \left[\frac{2\beta_2 X_1 X_1'}{X_1^2 + X_1'^2 \beta_2^2} + j \frac{X_1^2 - X_1'^2 \beta_2^2}{X_1^2 + X_1'^2 \beta_2^2} \right] \end{aligned} \tag{3}$$

Первое слагаемое в квадратных скобках равно $\sin 2\varphi_2$, второе слагаемое равно $\cos 2\varphi_2$.

где $2\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{2\beta_2 X_1 X_1'}{X_1^2 - (X_1' \beta_2)^2}$
 $\varphi_2 = \operatorname{arctg} \beta_2 \frac{X_1'}{X_1} = \operatorname{arctg} \frac{S X_1'}{r_2}$ (4)

Кроме того:

$$\frac{X_1 - X_1'}{2X_1 \times X_1'} = \frac{I_{\kappa 3} - I_{\kappa x}}{2}$$

Окончательно получаем:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{I}_{\kappa 3} + \bar{I}_{\kappa x}}{2} + j \frac{\bar{I}_{\kappa 3} - \bar{I}_{\kappa x}}{2} [\sin 2\varphi_2 + j \cos 2\varphi_2] \quad (5)$$

Геометрическим представлением функции $\sin 2\varphi_2 + j \cos 2\varphi_2$ является окружность. Получили простое обоснование круговой диаграммы асинхронного двигателя (рис.3).

Из круговой диаграммы следует, что полный ток статора I_1 :

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \frac{1}{X_1 X_1'} \sqrt{X_1'^2 + (X_1^2 - X_1'^2)(\sin \varphi_2)^2}$$

$$m = \frac{1}{2} \frac{X_1 - X_1'}{X_1 X_1'} \sin 2\varphi_2, \quad m_{\max} = \frac{1}{2} \frac{X_1 - X_1'}{X_1 X_1'}$$

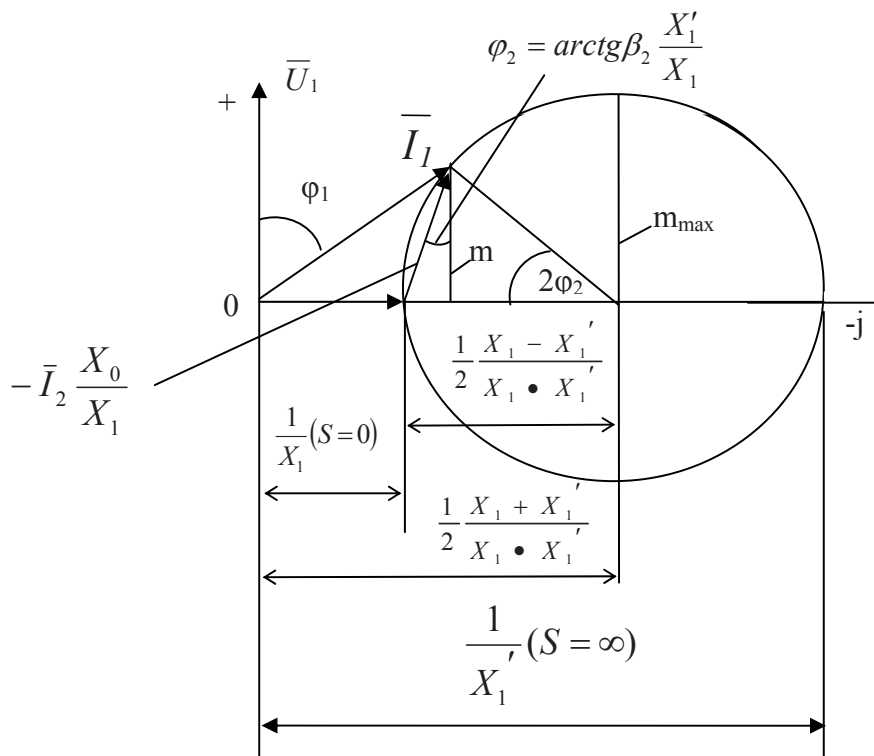


Рис. 3. Круговая диаграмма асинхронного двигателя

Практические формулы для определения параметров асинхронного короткозамкнутого двигателя

Из рис. 2 очевидны следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_n &= r_1 + X_0' \frac{\beta_{2n}}{1 + \beta_{2n}^2} \\ \sin \varphi_n &= X_1' + X_0' \frac{1}{1 + \beta_{2n}^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Откуда

$$\left. \begin{aligned} \beta_{2n} &= S_n \frac{X_2}{r_2} = \frac{\cos \varphi_n - r_1}{\sin \varphi_n - X_1'} \approx \frac{\cos \varphi_n}{\sin \varphi_n - X_1'} \\ X_0' &= \frac{\cos \varphi_n^2 + (\sin \varphi_n - X_1')^2}{\sin \varphi_n - X_1'} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\boxed{X_1 = X_1' + X_0' = \frac{1 - X_1' \sin \varphi_n}{\sin \varphi_n - X_1'}} \quad (9)$$

В справочных материалах на двигатели, как правило, указывается максимальное значение момента в базе номинального момента. Обратимся к рис. 3. Для номинального режима справедливы следующие соотношения:

$$\frac{M_{\max}}{M_n} = m_{\max}, \quad m_{\max} = \frac{X_1 - X_1'}{2X_1X_1'}, \quad m_n = \cos \varphi_n$$

Откуда

$$\cos \varphi_n = \frac{1}{m_{\max}} \frac{X_1 - X_1'}{2X_1X_1'}$$

$$\text{и} \quad X_1 = \frac{X_1'}{1 - 2 \cos \varphi_n m_{\max} \cdot X_1'} \quad (10)$$

Равенство соотношений (8) и (10) дает следующее уравнение для расчетов X_1'

$$\boxed{X_1'^2 (m_{\max} \cdot \sin 2\varphi_n + 1) - 2X_1' (\sin \varphi_n + m_{\max} \cdot \cos \varphi_n) + 1 = 0} \quad (11)$$

В таблице 1 приведены значения X_1' для типовых значений $\cos \varphi_n$ и m_{\max} .

Таблица 1
Значение параметра X_1' для ряда значений m_{\max}
и $\cos \varphi_n$ двигателя

$\cos \varphi_n \backslash m_{\max}$	0,75	0,8	0,85	0,9
2,0	0,29	0,279	0,27	0,26
2,3	0,254	0,244	0,236	0,23
2,5	0,235	0,225	0,217	0,21

Более точно X_1' при отсутствии значения m_{\max} определяется следующим образом. Проводится опыт холостого хода двигателя. Замеряется ток I_{10} и $\cos \varphi_0$.

$$X_{1(o.e.)} = \frac{I_{1H}}{I_{10} \sin \varphi_0} \approx \frac{I_{1H}}{I_{10}} \quad (12)$$

$$X_1' = \frac{X_1 \sin \varphi_H - 1}{X_1 - \sin \varphi_H} \quad (13)$$

Если отсутствует значение m_{\max} и нет возможности провести опыт холостого хода, рекомендуется принять $X_1' = 0,23$.

Как правило, в электромагнитном отношении статор и ротор асинхронного двигателя близки к симметрии, поэтому принимаем что $X_2 = X_1$, $X_2' = X_1'$, учитывая, что $X_1' = X_1 - \frac{X_0^2}{X_2}$

и $X_0' = \frac{X_0^2}{X_1}$, получаем $X_0 = \sqrt{X_1^2 - X_1' X_1}$

На основании (1) и (7) записываем:

$$\beta_{2H} = S_H \frac{X_2}{r_2} = S_H \frac{X_1}{r_2} = S_H \frac{1 - X_1' \sin \varphi_H}{\sin \varphi_H - X_1'} \cdot \frac{1}{r_2} \quad \text{или}$$

$$\frac{S_H}{r_2} \cdot \frac{1 - X_1' \sin \varphi_H}{\sin \varphi_H - X_1'} = \frac{\cos \varphi_H}{\sin \varphi_H - X_1'}$$

откуда

$$r_2 = S_H \frac{1 - X_1' \sin \varphi_H}{\cos \varphi_H} \quad (14)$$

Получили третью, кроме (8) и (11), сравнительно простую и практически полезную формулу. Итак, определены значения всех параметров двигателя, используемых для расчетов процессов: $X_1 = X_2$, X_0 , $X_1' = X_2'$, Γ_2 .

Пример расчета режима работы асинхронного двигателя при минимальном объеме измерений

Для конкретного двигателя рассчитаны параметры и известен ток статора I_1 (о.е.).

Необходимо определить момент на валу, $\cos \varphi$ двигателя и скольжение (скорость).

На основании расчетных соотношений и круговой диаграммы ниже приведены формулы для расчета переменных, подлежащих определению.

Согласно (6)

$$\sin \varphi_2 = X_1' \sqrt{\frac{(I_1 X_1)^2 - 1}{X_1^2 - X_1'^2}}$$

$$m = I_{1a} = \frac{X_1 - X_1'}{2 X_1 X_1'} \sin 2\varphi_2$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}$$

$$S = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2 \cdot r_2}{X_1'}$$

Список литературы

1. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Часть II. «Энергия», 1965.
2. Эпштейн И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1980. – 192 с.

References

1. M. P. Kostenko, L. M. Piotrovsky. Elektricheskie mashini (Electric machines). Part of II. "Energy", 1965.
2. Epstein I.I. Avtomatizirovanniy electropriwod peremennogo toka (Automatic electric drive of alternating current). - M.: Energyizdat, 1980. - 192 p.

Поступила в редакцию 10.07 2014 г.