

УДК 261.313.333.1

И. И. Эпштейн, д-р техн. наук

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ – НОВЫЙ РАКУРС

Аннотация. Приведено теоретическое обоснование представления асинхронного двигателя в виде специфического вращающегося трансформатора. Получена схема замещения двигателя и выражения для коэффициентов взаимного приведения переменных статора и ротора, позволяющая рассматривать двигатель в виде единой схемы с включением в нее произвольной нагрузки в цепи ротора.

Ключевые слова: двигатель асинхронный, вращающийся трансформатор, схема замещения, параметры, коэффициент приведения, сопротивление короткого замыкания

I. I. Epshteyn, ScD.

REPLACEMENT SCHEME ASYNCHRONOUS MOTORS – NEW ANGLE

Abstract. Theoretical substantiation of representation of the asynchronous engine in the form of specific rotating transformer. Received the equivalent circuit of the engine and expressions for the coefficients of mutual bring variable stator and rotor, allowing to consider the engine in the form of a single scheme to include arbitrary load in the rotor circuit.

Keywords: motor, asynchronous, rotary transformer, equivalent circuit, parameters, reduction coefficient, resistance short circuit

I. I. Епштейн, д-р техн. наук

СХЕМА ЗАМЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА – НОВИЙ РАКУРС

Анотація. Приведено теоретичне обґрунтування подання асинхронного двигуна у вигляді специфічного обертового трансформатора. Отримано схему заміщення двигуна і вирази для коефіцієнтів взаємного приведення змінних статора і ротора, яка дозволяє розглядати двигун у вигляді єдиної схеми з включенням в неї довільного навантаження в ланцюзі ротора.

Ключові слова: двигун, асинхронний, що обертований трансформатор, схема заміщення, параметри, коефіцієнт приведення, опір короткого замикання

1. Постановка задачи. В проектной практике по электроприводам переменного тока автор столкнулся с отсутствием четкой трактовки некоторых распространенных положений, касающихся процессов в асинхронном двигателе. Конкретно:

1.1. Асинхронный двигатель с фазным ротором декларируется как вращающийся трансформатор, имеется в виду наличие первичной обмотки (статор), подключаемой к сети, и вторичной обмотки (ротор), к которой подключаются внешние электрические устройства. Но это положение не очевидно, поскольку фундаментальное для двухобмоточного трансформатора соотношение $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ в данном случае не выполняется.

1.2. Приведение параметров и переменных от одной обмотки двигателя к другой, используемое в практике расчетов процессов в электроприводах, также нуждается в строгом обосновании.

Для лучшего физического понимания процессов и упрощения расчетной практики указанные вопросы целесообразно концептуально объединить.

Рассматривается массовый тип механизмов мощностью свыше 1000 кВт, в частности центробежные вентиляторы главного проветривания шахт и насосы для перекачки воды и жидких нефтепродуктов. Для рассматриваемого типа механизмов применение регулируемого электропривода фактор существенной экономии электроэнергии. Повышение общей энергети-

ческой эффективности определяется также принятым типом электропривода.

Кoeffициент трансформации и коэффициент приведения. В асинхронном двигателе обмотки статора и ротора потенциально разъединены. Взаимодействие обмоток физически осуществляется через взаимодействие потоков, обусловленных токами указанных обмоток. Расчеты процессов в двигателе удобно выполнять, представив последний в виде электрической цепи. Но это возможно в том случае, если коэффициенты взаимной индукции обмоток будут одинаковыми. Переход от обмоток с разными коэффициентами взаимной индукции к виртуальным обмоткам с одинаковыми коэффициентами взаимной индукции осуществляется путем масштабирования токов, используя понятия коэффициента трансформации (коэффициента приведения). То же относится и к трансформаторам. Для физической четкости мы разделяем эти понятия.

Двухобмоточный трансформатор характеризуется двумя показателями:

– коэффициентом трансформации

$$K = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{I_{2н}}{I_{1н}} = \frac{W_1}{W_2}, \quad (1)$$

– напряжением короткого замыкания U_k (сопротивлением короткого замыкания X_k), обусловленным потоками рассеяния обмоток, причем не разделяют потоки рассеяния индивидуальных обмоток.

Поэтому сопротивление X_K может быть отнесено либо к первичной обмотке, либо ко вторичной обмотке согласно соотношению $X_{K_1} = K^2 \cdot X_{K_2}$.

Для двигателя числа витков и обмоточные коэффициенты статора и ротора пользователю не доступны, но коэффициент трансформации может быть определен (см. ниже). На данном этапе обозначаем его K_T и записываем:

$$\frac{U_{21n}}{K_T} = U_{2n}, \quad I_{21n} = \frac{I_{2n}}{K_T}. \quad (2)$$

Здесь U_{21n} и I_{21n} – приведенные к статору значения напряжения и тока ротора при коэффициенте трансформации K_T , но они в отличие от трансформатора не равны U_{1n} и I_{1n} .

Рассмотрим известную схему магнитной системы двигателя со стороны статора при номинальной частоте (рис. 1).

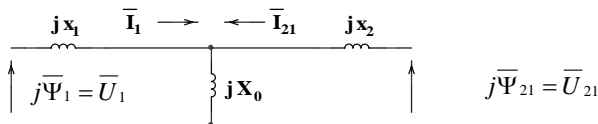


Рис. 1. Т-образная схема замещения двигателя

Здесь x_1, x_2, X_0 – индуктивные сопротивления рассеяния статора, ротора и сопротивление взаимной индукции,

$$\bar{I}_1, \quad \bar{I}_{21} \text{ – ток статора и ток ротора [см.(2)];}$$

$$\bar{\Psi}_1, \quad \bar{\Psi}_{21} \text{ – потокосцепления.}$$

Расчет параметров $X_0, X_1 = X_0 + x_1, X_2 = X_0 + x_2$, а также r_2 – приведенного к статору сопротивления ротора, по табличным данным двигателя изложены в [Л4].

Согласно рис. 1 записываем:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Psi}_1 &= \bar{I}_1(x_1 + X_0) + \bar{I}_{21}X_0 = \bar{I}_1X_1 + \bar{I}_{21}X_0 \\ \bar{\Psi}_{21} &= \bar{I}_1X_0 + \bar{I}_{21}(X_0 + x_2) = \bar{I}_1X_0 + \bar{I}_{21}X_2 \end{aligned} \right\} (3)$$

из (3) следует:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{\bar{\Psi}_1}{X_1} - \frac{X_0}{X_1} \bar{I}_{21} = \frac{\bar{\Psi}_1}{X_1} + \bar{I}_{12} \\ \bar{\Psi}_{21} &= \frac{X_0}{X_1} \bar{\Psi}_1 - (X_2 - \frac{X_0^2}{X_1}) \bar{I}_{21} = \frac{X_0}{X_1} \bar{\Psi}_1 + (X_2 - \frac{X_0^2}{X_1}) \bar{I}_{12} \frac{X_1}{X_0} \end{aligned} \right\} (4)$$

Здесь $\bar{I}_{12} = -\frac{X_0}{X_1} \bar{I}_{21}$ – составляющая тока статора, обусловленная током ротора.

В режиме холостого хода для неподвижного двигателя (ротор разомкнут) $I_2 = 0, I_{21} = 0, I_{12} = 0$, и соотношения (4) записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{\bar{U}_1}{jX_1} \\ \bar{U}_{21} &= \frac{X_0}{X_1} \bar{U}_1 \end{aligned} \right\} (5)$$

Согласно (2), (4) и (5) записываем:

$$\bar{U}_{21} = \bar{U}_2 K_T = \frac{X_0}{X_1} \bar{U}_1 \quad \text{или} \quad U_{2n} K_T \frac{X_1}{X_0} = U_{1n}$$

$$\bar{I}_{12} = -\bar{I}_{21} \frac{X_0}{X_1} \quad \text{или} \quad I_{12n} = \frac{I_{2n}}{K_T} \frac{X_1}{X_0}$$

Для асинхронного двигателя вводим определение коэффициента приведения

$$K_{np} = K_T \frac{X_1}{X_0}. \quad (6)$$

Это первое отличие асинхронного двигателя от трансформатора.

Второе отличие заключается в том, что соотношение $\frac{I_2}{K_{np}}$ относится не ко всему току статора, а к его части \bar{I}_{12} .

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_1 - \frac{U_1}{jX_1}$$

Для номинального режима ($I_{2n}, \cos \varphi_n$),

$$I_{12n} = \frac{I_{2n}}{K_{np}} = \sqrt{(I_{1n} \cos \varphi_n)^2 + (I_{1n} \sin \varphi_n - \frac{U_{1n}}{X_1})^2}. \quad (7)$$

Указанные отличия асинхронного двигателя и трансформатора обусловлены исполнением магнитной системы.

Ток холостого хода трансформатора менее 1% от номинального, а у двигателей вследствие наличия воздушного зазора между статором и ротором составляет 25 – 60 %.

Третье отличие очевидное: величина и частота напряжения ротора пропорциональны скольжению.

Обратимся к системе (4). В режиме короткого замыкания $\bar{\Psi}_2 = 0$. Решение второго уравнения дает

$$\bar{I}_{12} = \frac{\bar{U}_1}{j(X_2 - \frac{X_0^2}{X_1})(\frac{X_1}{X_0})^2}. \quad (8)$$

Знаменатель выражения (8) является сопротивлением короткого замыкания для тока I_{12} по аналогии с трансформатором это X_K . Приведенное к ротору сопротивление X_K равно X_K / X_{np}^2 .

Полученные результаты являются обоснованием схемы замещения асинхронного двигателя, показанной на рис. 2.

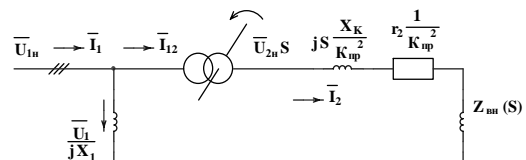


Рис. 2. Схема замещения двигателя в форме вращающегося трансформатора

$$K_{np} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad X_K = (X_1 X_2 - X_0^2) \frac{X_1}{X_0^2}$$

Обращаем внимание, что напряжение U_2 по таблице указано не для номинального режима, а для режима холостого хода. Но мы по аналогии с другими данными обозначаем как номинальное.

Выводы. Для асинхронного двигателя получены аналогичные параметры, что и для двухобмоточного трансформатора, но схема замещения отличается вынесением намагничивающего контура на внешние зажимы эквивалентного трансформатора и другим содержанием коэффициента приведения.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 183-74 Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. – М. : Изд-во стандартов, 2001.
 2. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 2003.
 3. ГОСТ 9362-60. Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 100 до 1000 кВт. Технические требования. – М. : Изд-во стандартов, 1960
 4. ГОСТ 18200-90. Машины электрические вращающиеся мощностью свыше 200 кВт. Двигатели синхронные. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1991.
 5. ДСТУ 3595-97. Электроприводы переменного тока общего назначения. Общие технические требования. – Введ. 1998-07-01. – К. : Госстандарт Украины, 1998. – 42 с.
 6. Рихтер Р. Электрические машины. Т. I-IV. – М. : 1935.
 7. Костенко М. П. Электрические машины. / М. П., Костенко Л. М. Пиотровский – 1965. Энергия, Часть II.
 8. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока: пер. с немецкого под ред. А. И. Вольдека. / К. П. Ковач., И. Рац . – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 334 с.
 9. Blashke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVEKTOR – Regelung von Drehfeldmaschinen, Siemens – Z., 1971.
 10. Эпштейн И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока /И. И. Эпштейн – М. : Энергоиздат, 1980.–192 с.
 11. Эпштейн И. И. Расчет параметров асинхронного двигателя. / И. И. Эпштейн // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 8 (126). – С. 40 – 45
- Asynchronous Motors. Test Methods], (2003), Moscow, Russian Federation, *Publishing House of Standards*.
3. GOST 9362-60. Jelektrodvigateli trehfaznye asinhronnye moshhnost'ju ot 100 do 1000 kVt. Tehnicheskie trebovanija [GOST 9362-60. The Three-Phase Asynchronous Electric Motors with Capacity from 100 to 1000 kW. Technical Requirements], (1960), Moscow, Russian Federation, *Publishing House of Standards*.
 4. GOST 18200-90. Mashiny jelektricheskie vrashhajushhiesja moshhnost'ju svyshe 200 kVt. Dvigateli sinhronnye. Obshhie tehnicheckie uslovija [GOST 18200-90. Rotating Electrical Machines with a Capacity of More than 200 kW. Synchronous Motors. General Specifications], (1991), Moscow, Russian Federation, *Publishing House of Standards*.
 5. DSTU 3595-97. Jelektroprivody peremennogo toka obshhego naznachenija. Obshhie tehnicheckie trebovanija. [DSTU 3595-97. The AC Drives General Purpose. General Technical Requirements, Introduction. 1998-07-01], (1998), Kiev, Ukraine, *State Standard of Ukraine*, 42 p.
 6. Richter R. Jelektricheskie mashiny [Electric Machines]. (1935), Moscow, Russian Federation, Vol. I – IV.
 7. Kostenko M.P., Piotrovski L.M., Jelektricheskie mashiny [Electric Machines], (1965), Vol. II, *Energy*.
 8. . Kovacs C.P., Ruts I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka: per. s nemeckogo pod red. A. I. Vol'deka. [Transitional Processes in the Machines of Alternating Current: Transl. from German Ed. by A.I. of Valdeka], (1963), Moscow-Leningrad, Russian Federation, *Gosenergoizdat*, 334 p.
 9. Blashke F., (1971), Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVEKTOR, *Regelung von Drehfeldmaschinen, Siemens – Z*
 10. Epstein I.I. Avtomatizirovannyj jelektroprivod peremennogo toka [Automated AC Motors], (1980), Moscow, Russian Federation, *Energoizdat*, 192 p.
 11. Epstein I.I. Raschet parametrov asinhronnogo dvigatelja. [Calculation of Parameters of Asynchronous motor], (2014), *Energoberezenie. Energy. Energy audit*, No. 8 (126), pp. 40 – 45.

Получено 15.07.2014

References

1. .GOST 183-74 Mashiny jelektricheskie vrashhajushhiesja. Obshhie tehnicheckie trebovanija [GOST 183-74 Rotating Electrical Machines. General Technical Requirements], (2001), Moscow, Russian Federation, *Publishing House of Standards*.
2. GOST 7217-87. Mashiny jelektricheskie vrashhajushhiesja. Dvigateli asinhronnye. Metody ispytaniy. [GOST 7217-87. Rotating Electrical Machines. The



Эпштейн
Исаак Израилевич,
д-р техн. наук, проф.,
директор по науке
ЧАО Харьковского
электрошитоного завода.
61004, г. Харьков,
ул. Примакова, 46.
Тел (057) 752-10-11,
752-10-13, 752-12-22.
E-mail:
epshtein_i_i@mail.ru