

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

П.П. Свит, Б.В. Сёмкин



В исследовании рабочих режимов работы асинхронных машин (АМ) большую помощь оказывают схемы замещения, позволяющие весьма просто устанавливать соотношения отдельных величин, характеризующих работу АМ в заданных условиях. Схемы замещения облегчают изучение векторных и круговых диаграмм. На рисунке 1 приведены Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения асинхронного двигателя (АД). Определение активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора трехфазных АД с короткозамкнутыми роторами производится ниже аналитическим методом, дающим достаточную точность для практических расчетов. Расчеты осуществляются на основании каталожных данных [1-4] и не требуют экспериментальных данных короткого замыкания, холостого хода и других опытов.

индуктивное сопротивление взаимоиндукции приведенной вторичной и первичной цепей x_μ и активное сопротивление r_μ , учитывающее потери в стали. Ток этой цепи равен геометрической сумме токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2' . При изменении нагрузки на валу АМ, т.е. при изменении скольжения s , напряжение на зажимах обычно остается постоянным, а поток взаимоиндукции и соответствующая ему электродвижущая сила (ЭДС) $E_1 = E_2'$ на зажимах намагничивающего контура изменяются под влиянием падения напряжения $\dot{I}_1(r_1 + jx_1)$. Этой схеме замещения соответствует система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_\mu = \dot{I}_1 - \dot{I}_2' \\ \dot{U}_1 - \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2'(r_2'/s + jx_2') = \dot{E}_2' \end{cases} \quad (1)$$

Более удобной схемой замещения АМ является Г-образная схема замещения (рисунк 1 б), в которой намагничивающий контур вынесен на сетевые зажимы. Ток \dot{I}_{00} в ответвленном контуре при $\dot{U}_1 = const$ и изменении скольжения s остается постоянным, а изменяется лишь ток в главной цепи. Т-образная схема замещения АМ может быть преобразована в Г-образную схему. При таком преобразовании первичный ток \dot{I}_1 и мощность, потребляемая из сети, остаются неизменными. Для получения приведенного вторичного тока \dot{I}_2' АД необходимо ток \dot{I}_2'' умножить на коэффициент k , являющийся комплексной величиной. Параметры Т-образной схемы замещения при преобразовании в Г-образную должны быть умножены на c_1 и c_1^2 [5-8]. Поправочный коэффициент k изменяет основные параметры главной и намагничивающей цепей схем замещения, токи по величине и фазовым углом, но не зависит от скольжения. Согласно [5], k можно определить как:

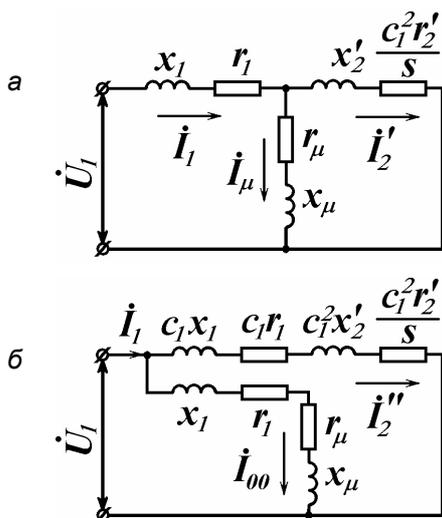


Рисунок 1 – Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения асинхронной машины

В Т-образной схеме замещения (рис. 1 а) в намагничивающей цепи фигурируют

$$k = 1 + \frac{Z_1}{Z_\mu} \approx 1 + \frac{Z_k}{2Z_\mu} \approx 1 + \frac{I_\mu}{2I_k} \approx 1 + \frac{I_\mu}{2k_i I_n} \quad (2)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

где Z_1, Z_μ, Z_k - сопротивления статорной цепи, цепи намагничивания и короткого замыкания, соответственно;

I_k, I_μ, I_n - токи короткого замыкания, цепи намагничивания и номинальный;

k_i - кратность пускового тока номинальному.

Подставив в выражение (2) средние значения токов холостого хода и короткого замыкания $I_\mu = 0,3I_n$ и $I_k = 5I_n$ при номинальном напряжении, получим:

$$c_1 \approx 1 + 0,3/2 \cdot 5 \approx 1,03.$$

В двигателях общего назначения c_1 мало отличается от единицы: $c_1 \approx 1,02 - 1,06$ [6].

Обозначим $\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1x_2')^2} = Z$ и на основании [5] определим:

$$Z = \frac{(\sqrt{3} \cdot U_{1n})^2 (1 - s_n)}{2c_1(P_{2n} + \Delta P_m) \lambda_{\max}} - r_1, \quad (3)$$

где $U_{1n} = 220 \text{ В}$ - номинальное фазное напряжение;

P_{2n} - номинальная мощность на валу, Вт;

$\Delta P_m = 0,01P_{2n}$ - механические потери, Вт;

λ_{\max} - кратность максимального момента номинальному;

s_n - номинальное скольжение;

x_1, x_2' - индуктивные фазные сопротивления статора и ротора.

Активные сопротивления статора r_1 и ротора r_2' зависят от их температуры Θ . Зависимость сопротивления обмоток, выполненных из меди, от температуры выражается формулой [5]:

$$r_{\Theta 2} = \frac{235 + \Theta_2}{235 + \Theta_1}. \quad (4)$$

Для обмоток, выполненных из алюминия, выражение (4) принимает вид:

$$r_{\Theta 2} = \frac{245 + \Theta_2}{245 + \Theta_1}. \quad (5)$$

В справочной литературе [1-4] активные сопротивления обмоток статора АД приводятся для $\Theta = 20^\circ \text{C}$, а, например, при изоляционной системе класса нагревостойкости B рабочая температура $\Theta_p = 75^\circ \text{C}$; $F - \Theta_p = 115^\circ \text{C}$. Поэтому в выражении (3) сопротивление r_1 должно соответствовать рабочей температуре,

рассчитанной по (4), согласно классу изоляции АД [4]¹.

Обозначим $x_1 + c_1x_2' = X$, тогда

$$X = \sqrt{Z^2 - r_1^2}. \quad (6)$$

Из формулы Клосса для относительного вращающего момента выводится выражение для определения критического (максимального) скольжения s_k :

$$s_k = s_n (\lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1}). \quad (7)$$

Для АД с обычным ротором критическое скольжение определяется по формуле [5]:

$$s_k = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}. \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) активное сопротивление ротора:

$$r_2' = \frac{Z s_n (\lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1})}{c_1}. \quad (9)$$

На основании Г-образной схемы замещения определим номинальный ток ротора [5, 7]:

$$I_{2n}' = I_{2n}'' c_1 = \frac{U_{1n}}{\sqrt{(r_1 + c_1 r_2' / s_n)^2 + X^2}}. \quad (10)$$

На основании системы уравнений (1), соответствующей Т-образной схеме замещения, приравняем второе и третье уравнения, заменив x_1 на $X - c_1 x_2'$, получим:

$$U_{1n} - I_{1n} \sqrt{r_1^2 + (X - c_1 x_2')^2} - I_{2n}' \sqrt{(r_2' / s_n)^2 + x_2'^2} = 0. \quad (11)$$

Решение уравнения (11) целесообразно вести методом подстановки или с использованием компьютерной техники, например, с применением программного обеспечения «Mathcad» или «Excel». Определив x_2' , находят x_1 из равенства: $x_1 = X - c_1 x_2'$.

Для определения активного r_μ и реактивного x_μ сопротивлений цепи намагничивания воспользуемся основными расчетными соотношениями трехфазных асинхронных двигателей. Из Т-образной схемы замещения видно, что сопротивление $Z_\mu = r_\mu + jx_\mu$ определяется как:

$$Z_\mu = \frac{E_1}{I_\mu}. \quad (12)$$

ЭДС обмотки статора, созданной магнитным потоком Φ_1 определяется по [7]:

¹ Далее в расчетах активные сопротивления статора и ротора соответствуют рабочим температурам.

$$E_1 = \pi \sqrt{2} \omega_1 k_{o\sigma 1} f_1 \Phi_1, \quad (13)$$

где ω_1 - число последовательно соединенных витков на фазу обмотки статора;
 $k_{o\sigma 1}$ - обмоточный коэффициент статора;
 f_1 - частота тока в статорной обмотке.

Магнитный поток выражается формулой:

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} B_{m1} \tau \lambda, \quad (14)$$

где B_{m1} - магнитная индукция в воздушном зазоре;
 τ - полюсное деление;
 λ - длина активной стали сердечника статора, м.

Магнитная индукция может быть определена по выражению [7]:

$$B_{m1} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_\mu \delta} F_1, \quad (15)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость;

k_δ - коэффициент Картера (коэффициент воздушного зазора);

k_μ - коэффициент насыщения магнитной цепи;

δ - воздушный зазор, м;

F_1 - намагничивающая сила, приходящаяся на один полюс.

Намагничивающая сила согласно [7]:

$$F_1 = \frac{3\sqrt{2} \omega_1 k_{o\sigma 1} I_1}{\pi p}, \quad (16)$$

где p - число полюсов статора.

На основании (13)-(16) получим выражение для определения ЭДС:

$$E_1 = \frac{4,8 \tau \lambda \omega_1^2 k_{o\sigma 1}^2 f_1 I_1}{k_\delta k_\mu \delta p 10^3}. \quad (17)$$

Полюсное деление определяется по формуле [7]:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (18)$$

где D - внутренний диаметр сердечника статора, м.

Согласно [7] обмоточный коэффициент статорной обмотки равен:

$$k_{o\sigma 1} = k_{p1} k_{y1}, \quad (19)$$

k_{p1} - коэффициент распределения обмотки статора;

k_{y1} - коэффициент укорочения шага обмотки статора.

Для вычисления коэффициента k_{p1} применяется выражение [7]:

$$k_{p1} = \frac{\sin(\pi / 2m)}{q_1 \sin(\pi / m q_1)}, \quad (20)$$

где $m = 3$ - число фаз;

$q_1 = \frac{z_1}{2pm}$ - число пазов на полюс и фазу;

z_1 - число пазов статора.

Коэффициент k_{y1} определяется по формуле:

$$k_{y1} = \sin(\beta_1 \pi / 2), \quad (21)$$

где $\beta_1 = \frac{2py}{z_1}$ - относительный шаг

обмотки статора;

y - шаг обмотки по пазам.

Коэффициент воздушного зазора может быть вычислен по формуле [8]:

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \delta}, \quad (22)$$

где $t_1 = \frac{\pi D}{z_1}$ - зубцовое деление статора;

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{a}{2\delta} \operatorname{arctg}\left(\frac{a}{2\delta}\right) - \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{2\delta}\right)^2} \right) \right];$$

a - ширина отверстия паза, м (рисунок 2).

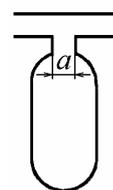


Рисунок 2 – К определению коэффициента воздушного зазора при полузакрытом пазе

Коэффициент насыщения магнитной цепи k_μ - переменная величина, характеризующая насыщение сердечников. Коэффициент k_μ равен отношению всей намагничивающей силы цепи намагничивания к намагничивающей силе воздушного зазора. Он определяется по данным расчета магнитной цепи из кривой холостого хода машины. Для трехфазных АД общего назначения небольшой мощности с достаточной для практики точностью можно считать $k_\mu \approx 1,05 - 1,1$ [6, 7].

На холостом ходу ток цепи намагничивания равен току статора, поэтому с учетом (12) и (17) Z_μ равно:

$$Z_\mu = \frac{4,8 \tau \lambda \omega_1^2 k_{o\sigma 1}^2 f_1}{k_\delta k_\mu \delta p 10^3}. \quad (23)$$

По [9] могут быть определены активное и реактивное сопротивление цепи намагничивания:

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

$$r_{\mu} = Z_{\mu} \cos \rho = \frac{P_{cm}}{mI_{\mu}^2}, \quad (24)$$

$$x_{\mu} = Z_{\mu} \sin \rho$$

где ρ - угол потерь;

P_{cm} - потери в стали.

Таким образом, получен аналитический метод расчета параметров схем замещения по каталожным данным. На основании расчетных параметров строятся рабочие характеристики, которые с достаточной для практических целей точностью позволяют судить об изменениях скорости вращения ротора, вращающего момента, тока статора, $\cos\phi$ и КПД в зависимости от полезной мощности двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тембель П.В., Геращенко Г.В. Справочник по обмоточным данным электрических машин и аппаратов. – 3-е изд., перераб. – К.: Техника, 1981. – 480 с.
2. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
3. Петриков Л.В., Корначенко Г.Н. Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 496 с.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик и др. – Энергоатомиздат, 1982.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Миконянца. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
6. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
7. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2 ч. Ч. 2. – Машины переменного тока. – Учебник для студентов высш. Техн. Учеб. Заведений. Изд. 3, перераб. Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
8. Петров Г.Н. Электрические машины. В 2 ч. Ч. 2. – Асинхронные и синхронные машины. М. - Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
9. Постников И.М., Адаменко А.И. О параметрах схемы замещения и точной круговой диаграмме асинхронной машины. // Электричество. – № 12. – 1956. – С. 25-28.