

Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным

**Мощинский Ю.А.,
Беспалов В.Я.,
Кирякин А.А.**

Предложена безитерационная методика определения параметров схемы замещения (СЗ) асинхронной машины на основе данных каталога: скорость поля статора, коэффициентов мощности и полезного действия для номинальной (100%) и одной из частичных нагрузок (25% и 50%); кратности пускового тока, максимального и пускового момента. Даны выражения для расчета активного и индуктивного сопротивлений ротора при изменении скольжения. Приведены результаты расчета параметров СЗ асинхронных двигателей различной мощности, которые показали удовлетворительное для инженерной практики совпадение с параметрами, полученными при проектировании этих двигателей.

Для исследования эксплуатационных режимов асинхронных двигателей (АД) используются рабочие и механические характеристики, которые определяются экспериментально или рассчитываются на основе СЗ. Для применения СЗ (рис.1) необходимо знать её параметры:

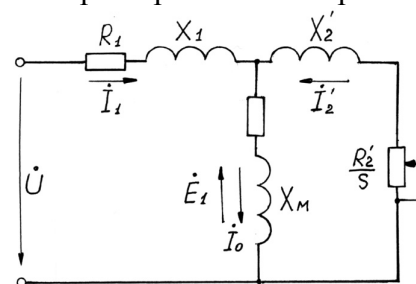
- R_1, R_2', R_M – активные сопротивления фаз статора, ротора и ветви намагничивания;
- X_1, X_2', X_M – индуктивные сопротивления рассеяния фаз статора ротора и ветви намагничивания.

Эти параметры требуются для определения пусковых токов при выборе магнитных пускателей и контакторов, при выполнении защит от перегрузок, межфазных замыканий и замыканий на корпус, для регулирования и настройки системы управления электроприводом, для моделирования переходных процессов. Кроме того, они необходимы для расчета пускового режима АД, выбора режимов работы электропривода с повышенными энергетическими показателями, определения характеристик асинхронного генератора, а также при проектировании асинхронных машин с целью сопоставления исходных и проектных параметров. В некоторых моделях используются усложненные СЗ.

Параметры СЗ могут быть определены, если известны размеры активной зоны и обмоточные данные, которые не всегда доступны разработчикам электропривода; необходимо, кроме того, располагать соответствующими методиками расчета.

Параметры СЗ могут быть также найдены экспериментально и с помощью различных измерений. Методика проведения испытаний трехфазной машины устанавливается государственным стандартом. Параметры рассчитываются на основе данных опыта холостого хода (ХХ) при отсутствии нагрузки на валу и различных значениях напряжения и опыта короткого замыкания (КЗ) при номинальном токе, что требует регулирующих устройств. Из опыта ХХ определяют параметры СЗ при отключенной ветви ротора. Для этого ротор вращают с синхронной частотой, соответствующей базовой, с помощью синхронного двигателя; только в этом случае токи в обмотке ротора равны нулю. Опыт КЗ проводят при пониженной частоте (25-30 Гц), чтобы уменьшить эффект вытеснения тока и влияние гармоник.

Выполнение точных измерений непосредственно на объектах, где установлен двигатель, не всегда возможно. В некоторых электроприводах АД соединяются с нагрузкой через редуктор или различные механические передачи. Иногда двигатель и нагрузка монтируются в одном корпусе, являясь общей частью электропривода. В таких



случаях стоимость АД увеличивается на 10-15%, так как выдаваемая заводом-изготовителем информация о параметрах, требует проведения дополнительных исследований. Для крупных предприятий, имеющих большой парк асинхронных машин, эти расходы могут быть значительными.

Известны попытки ряда авторов определить параметры СЗ на основе уравнений асинхронной машины и её характеристик. В литературе описаны специальные методики определения параметров.

Некоторые авторы находят параметры СЗ, применяя итерационные методы. Однако такие расчеты сложны для применения на практике. Необходима разработка простой методики определения параметров АД, доступной широкому кругу специалистов. Анализ публикаций последних лет показывает, что интерес к этой проблеме не ослабевает.

Каждый изготовленный двигатель имеет соответствующие ГОСТ характеристики, которые приведены в каталогах. Эти данные можно представить следующим образом.

Режим номинальной мощности (100%-ая нагрузка): линейное напряжение U_n . и ток статора I_n ., полезная мощность P_{2n} , коэффициент полезного действия η_n ., коэффициент мощности $\cos\varphi_n$., частота вращения n_n . (или скольжение s_n .).

Режим максимального момента: кратность максимального момента $K_M = M_m/M_n$.

Режим КЗ (заторможенный ротор): кратности пускового момента $K_{\Pi} = M_{\Pi}/M_n$. и пускового тока $K_i = I_{\Pi}/I_n$.

Кроме того, в каталогах приводятся энергетические показатели (η_{p*} , $\cos\varphi_{p*}$) при нагрузке АД, равной 25, 75, 50 и 125% номинальной. На основе этих данных и при допущениях, общепринятых в теории электрических машин, составим алгоритм расчета параметров СЗ асинхронных машин, который может быть реализован на персональном компьютере в диалоговом режиме.

В большинстве методик по определению параметров СЗ используются упрощенные аналитические выражения для расчета тока ХХ I_0 и критического скольжения s_k . Ток холостого хода с меньшей погрешностью найдём из выражения:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p*}^2 - \left(\frac{p^*(1-s_n)}{(1-p^*s_n)} \cdot I_{1n}\right)^2}{1 - \left(\frac{p^*(1-s_n)}{(1-p^*s_n)} \cdot I_{1n}\right)^2}}; \quad (1)$$

где I_{1n} - номинальный ток:

$$I_{1n} = \frac{P_{2n}}{mU_f\eta_n \cos\varphi_n}; \quad (2)$$

I_{1p*} - ток при частичной нагрузке, равной $p^*=0.25$ или 0.5:

$$I_{1p*} = \frac{P_{2p*}}{mU_f\eta_{p*} \cos\varphi_{p*}}; \quad (3)$$

U_f – фазное напряжение; m – число фаз статора ;

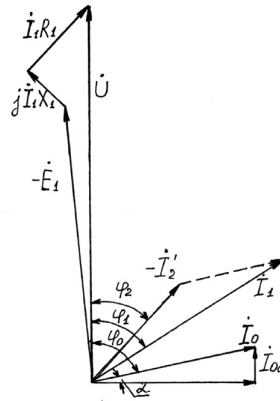
Из формулы Клосса получаем соотношение для расчета критического скольжения:

$$s_k = s_n \frac{K_M + \sqrt{K_M^2 - (2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (K_M - 1))}}{1 - 2s_n\beta \cdot (K_M - 1)} \quad (4)$$

где $\beta = \frac{R_1}{C_1 R_2}$;

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_M} = 1 + \frac{I_0}{2K_i I_{1n}};$$

значение коэффициента β находится в диапазоне 0.6-2.5, поэтому принимаем $\beta=1.5$.



Запишем основные уравнения АД для режима номинальной нагрузки:

$$\begin{cases} U = -E_1 + jX_1 I_{1н} + R_1 I_{1н}; \\ 0 = E_1 + jX_2' I_2 + R_2' \frac{I_2'}{s_H}; \\ I_{1н} = I_0 + (-I_2'); \end{cases} \quad (5)$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих (5), изображена на рисунке 2. Спроектируем токи на ось, проходящую через вектор U:

$$I_{1н} \cos \varphi_{1н} = I_0 \cos \varphi_0 + I_2' \cos \varphi_2; \quad (6)$$

Найдём проекцию тока ротора $I_2' \cos \varphi_2$, для чего определим ток I_2' из системы (3):

$$I_2' = \frac{U}{Z_1 + C_1 Z_2'}, \quad (7)$$

где $Z_1 = R_1 + jX_1$; $Z_2' = R_2' + jX_2'$,
тогда:

$$I_2' \cos \varphi_2 = \frac{U \left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s_H} \right)}{\left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s_H} \right) + (X_1 + C_1 X_2')}. \quad (8)$$

Это соотношение представим в виде:

$$I_2' \cos \varphi_2 = \frac{U \left(\beta + \frac{1}{s_H} \right)}{C_1 R_2' \left(\left(\beta + \frac{1}{s_H} \right)^2 + \gamma^2 \right)}, \quad (9)$$

где $\gamma = \frac{X_H}{C_1 R_2'}$; $X_H = X_1 + C_1 X_2'$.

Подставляя (9) в (6), находим:

$$U \left(\beta + \frac{1}{s_H} \right) = C_1 R_2' (I_{1н} \cos \varphi_{1н} - I_0 \cos \varphi_0) \cdot \left(\left(\beta + \frac{1}{s_H} \right)^2 + \gamma^2 \right). \quad (10)$$

Из выражений для максимального момента

$$M_{\text{м}} = \frac{mU^2}{2\omega_1 C_1 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_H^2} \right)} \quad (11)$$

и критического скольжения

$$s_k = \frac{C_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}} = \frac{1}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}} \quad (12)$$

получаем следующее уравнение:

$$\frac{M_m 2\omega_1 C_1}{mU^2} = \frac{1}{C_1 R_2' (\beta + 1/s_k)}, \quad (13)$$

где $\omega_1 = 2\pi f$; f – частота сети.

Уравнения (9) и (13) с учетом (12) объединим в систему, которая при подстановке в

(13) $M_m = \frac{P_{2H} K_M}{(1-s_H)}$ принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{mU^2(1-s_H)}{2\omega_1 C_1 K_M P_{2H}} = C_1 R_2' \left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) \\ \left(\beta + \frac{1}{s_H} \right) = C_1 R_2' \left(\frac{I_{1H} \cos \varphi_{1H} - I_0 \cos \varphi_0}{U} \right) \times \left(\frac{2\beta}{s_H} + \frac{1}{s_H^2} + \frac{1}{s_k^2} \right) \end{cases} \quad (14)$$

В результате преобразований системы (14) получим квадратное уравнение относительно β :

$$\beta^2 + B\beta + C = 0, \quad (15)$$

где

$$B = \frac{1}{s_H} + \frac{1}{s_k} - \frac{2A_0 A_1}{s_H}; \quad (16)$$

$$C = \frac{1}{s_H s_k} - A_0 A_1 \cdot \left(\frac{1}{s_H^2} + \frac{1}{s_k^2} \right); \quad (17)$$

$$A_0 = \frac{(I_{1H} \cos \varphi_{1H} - I_0 \cos \varphi_0)}{U}; \quad (18)$$

$$A_1 = \frac{mU^2(1-s_H)}{2C_1 K_M P_{2H} \omega_1}; \quad (19)$$

принимая равным $\varphi_0 = 87^\circ$. Решив (12), находим:

$$\beta = -\frac{B}{2} + \sqrt{B^2 - 4C}. \quad (20)$$

Из первого уравнения системы (11) определяем активное сопротивление ротора:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) C_1} \quad (21)$$

Тогда активное сопротивление статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta \quad (22)$$

Из (12) находим значение γ , которое позволяет определить индуктивное сопротивление X_H :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2} \right) - \beta^2}; \quad X_H = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2'.$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления X_H сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных АД, тогда :

$$X_1 = 0.42 X_H, \quad X_2' = 0.58 \frac{X_H}{C_1}.$$

Согласно векторной диаграмме (рисунок 2) ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U \cos \varphi_{1н} - R_1 I_{1н})^2 + (U \sin \varphi_{1н} + X_1 I_{1н})^2}, \quad (23)$$

тогда:

$$X_M = \frac{E_1}{I_0}. \quad (24)$$

Для нахождения магнитных и механических потерь представим суммарные потери в двигателе ΔP в виде суммы постоянных P_0 и переменных $P_v = m I_{1р}^2 R_v$ потерь. Для номинального режима суммарные потери вычисляются по формуле:

$$\Delta P_n = m I_{1н}^2 R_v + P_0 = P_{2н} \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) - 0.005 \frac{P_{2н}}{\eta_n}. \quad (25)$$

При p^* - й нагрузке двигателя:

$$\Delta P_{p^*} = m I_{1р^*}^2 R_v + P_0 = P_{2р^*} \left(\frac{1}{\eta_{p^*}} - 1 \right) - 0.005 \frac{P_{2р^*}}{\eta_{p^*}}. \quad (26)$$

Решив совместно (25) и (26), находим:

$$R_v = \frac{\Delta P_n - \Delta P_{p^*}}{m(I_{1н}^2 + I_{1р^*}^2)}; \quad P_0 = \Delta P_n - m I_{1н}^2 R_v.$$

Разделение постоянных потерь на механические и магнитные осуществим, приняв, что механические потери составляют 1/3 постоянных, т.е. $P_{мех} = 0.33P_0$; $P_M = 0.66P_0$. По известным потерям P_0 вычисляем активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_M = \frac{P_M}{I_0^2}. \quad (27)$$

Активная составляющая тока холостого хода $I_{0а}$ и угол α , обусловленный магнитными потерями в магнитопроводе, соответственно равны:

$$I_{0а} = \frac{P_M}{E_1}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{I_{0а}}{I_0}.$$

Активное сопротивление ротора в режиме КЗ ($s = s_n = 1$) находим из соотношения:

$$K_{\Pi} M_n = m I_{2\Pi}^2 R'_{2\Pi}, \quad (28)$$

$$\text{тогда:} \quad R'_{2\Pi} = \frac{K_{\Pi} (P_{2н} + P_{мех} + 0.005 \frac{P_{2н}}{\eta_n})}{m(1 - s_n) I_{2\Pi}^2}. \quad (29)$$

Здесь $I_{2\Pi}^2 = 0.97 K_i I_{1н}^2$ – приведенный ток фазы ротора в режиме КЗ.

Из (7) при $s = s_n$ находим комплексное сопротивление:

$$Z_{\Pi} = Z_{1\Pi} + C_1 Z'_{2\Pi}; \quad (30)$$

$$Z_{\Pi} = \frac{U}{I'_{2\Pi}}. \quad (31)$$

где $Z_{1\Pi} = R_1 + jX_{1\Pi}$; $Z'_{2\Pi} = R'_{2\Pi} + jX'_{2\Pi}$ – сопротивления фаз статора и ротора в режиме пуска.

Тогда индуктивное сопротивление $X_{\Pi} = X_{1\Pi} + C_1 X'_{2\Pi}$ находим из выражения:

$$X_{\Pi} = \sqrt{Z_{\Pi}^2 - (R_1 + C_1 R'_{2\Pi})^2}. \quad (32)$$

Сопротивление рассеяния фазы ротора определим, положив $X_{1\Pi} = X_1 \frac{X_{\Pi}}{X_n}$:

$$X'_{2\Pi} = \frac{X_{\Pi} - X_{1\Pi}}{C_1}. \tag{33}$$

При увеличении скольжения от s_H до s_{Π} сопротивления R_2' и X_2' вследствие вытеснения тока в стержнях и насыщения коронок зубцов ротора будут изменяться от значений $R'_2 = R'_{2H}$ и $X'_2 = X'_{2H}$ при $s = s_H$ до значений $R'_2 = R'_{2\Pi}$ и $X'_2 = X'_{2\Pi}$ при $s = s_{\Pi}$. Сопротивления ротора при любом скольжении будем находить по формулам:

- активное сопротивление ротора:

$$R'_2(s) = \begin{cases} R'_{2H}, & 0 \leq s \leq s_H; \\ R_a + R_b f_1(s), & s_H < s \leq 1, \end{cases}$$

- индуктивное сопротивление ротора:

$$X'_2(s) = \begin{cases} X'_{2H}, & 0 \leq s \leq s_H; \\ X_a + X_b f_2(s), & s_H < s \leq 1, \end{cases}$$

где

$$R_a = \frac{R'_{2H} - R'_{2\Pi} f_1(s_H)}{1 - f_1(s_H)}; \quad R_b = \frac{R'_{2\Pi} - R'_{2H}}{1 - f_1(s_H)};$$

$$X_a = \frac{X'_{2H} - X'_{2\Pi} f_2(s_H)}{1 - f_2(s_H)}; \quad X_b = \frac{X'_{2\Pi} - X'_{2H}}{1 - f_2(s_H)}.$$

Здесь $f_1(s)$ и $f_2(s)$ – функции, полученные аппроксимацией усредненных зависимостей коэффициентов K_r и K_x ; они равны соответственно:

$$f_1(s) = \frac{0.0185s - 0.375s^2 + s^2 \sqrt{s}}{0.035 + 0.612s^2 \sqrt{s}}; \tag{34}$$

$$f_2(s) = \frac{0.0358 - 0.556s^2 + s^2 \sqrt{s}}{0.0187 - 0.0151s^2 + 0.446s^2 \sqrt{s}}. \tag{35}$$

Разработанная методика может быть использована также и для определения параметров СЗ по экспериментальным данным, если последние будут сняты в перечисленных выше режимах. По приведенной методике были определены параметры АД различной мощности серий 4А, А4 и АД. В таблице 1 представлены параметры (числитель), рассчитанные по каталожным данным, и параметры (знаменатель), заложенные в проектные расчеты этих двигателей. В таблице 2 приведены результаты расчета рабочих характеристик по найденным параметрам (знаменатель) и данные каталога (числитель).

Таблица 1. Результаты расчета.

Тип	Р, кВт	Параметры схемы замещения, отн. ед.						
		R_1	X_1	X_M	R'_{2H}	X'_{2H}	$R'_{2\Pi}$	$X'_{2\Pi}$
4A100S4, $U_H=380$ В	3	0.081	0.101	2.51	0.0518	0.156	0.054	0.141
		0.078	0.089	2.2	0.053	0.13	0.057	0.14
4A160S4, $U_H=380$ В	15	0.054	0.098	3.65	0.0252	0.145	0.0344	0.137
		0.047	0.086	4	0.025	0.13	0.0388	0.15
4A225M2, $U_H=380$ В	55	0.02	0.075	4.74	0.0187	0.133	0.0233	0.124
		0.025	0.092	5.6	0.019	0.12	0.029	0.16
4A355S8, $U_H=380$ В	132	0.0272	0.0963	2.62	0.0155	0.136	0.0439	0.187
		0.024	0.12	2.9	0.017	0.16	0.051	0.2
A4-400Y-4, $U_H=6$ кВ	630	0.014	0.107	3.55	0.0114	0.0106	0.032	0.064
		0.013	0.127	3.88	0.0132	0.0119	0.0336	0.0685
4A3M-160, $U_H=6$ кВ	1600	0.00843	0.103	5.2	0.00884	0.157	0.034	0.0652
		0.00871	0.115	6.05	0.0103	0.182	0.03	0.068

Таблица 2. Результаты расчета рабочих характеристик.

Тип двигателя	Параметры				
	$s_n, \%$	$\eta_n, \%$	$\cos\varphi, \text{отн. ед.}$	$s_k, \%$	$M_m, \text{отн. ед.}$
4А 100 S4	4.4/4.1	82/85	0.83/0.82	31/28.4	2.4/2.33
4А 160 S4	2.3/2.1	88.5/88	0.88/0.882	16/14.4	2.3/2.3
4А 225 M2	1.8/2	91/87	0.92/0.927	11/9.61	2.5/2.57
4А 355 S8	1.3/1.4	93.5/91	0.85/0.89	5.5/5.7	2.2/2.4
A4-400У-4	1/1.3	95.2/95.9	0.88/0.91	4.4/4.7	2.3/2.53
4АЗМ-1600/6000	0.66/0.9	95.7/96.5	0.925/0.89	3.43/3.25	2.5/2.41

Сопоставление данных таблиц показывает, что погрешность расчета параметров характеристик не превосходит 15%, что вполне допустимо для инженерной практики.

Вывод. Разработанная методика позволяет с достаточной степенью точности находить параметры СЗ асинхронной машины на основе данных каталога. Предложенные аппроксимации сопротивлений ротора дают возможность учесть изменения их от скольжения при расчетах механических, рабочих и динамических характеристик АД, имеющих различную конфигурацию пазов.

Список литературы

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1980.
2. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А. Учет потерь в стали при расчетах переходных процессов асинхронных глубокопазных двигателей. – Изв. вузов. Электромеханика, 1989, № 4.
3. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытания электрических машин. – М.: Энергоиздат, 1990.
5. Кривицкий М.Я., Кузнецов М.И., Попосов С.В. Автоматизированная испытательная система для асинхронных вентиляторов. – Электротехника, 1990, № 5.
6. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. – Киев: Техника, 1992.
7. Смирнов Ю.В. Определение характеристик трёхфазных асинхронных двигателей малой мощности. – Электричество, 1996, № 8.
8. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд. – Донецк: ДПИ, 1979.
9. Коробейников Б.А., Ищенко А.И. Идентификация параметров математической модели глубокопазных асинхронных двигателей. – Изв. вузов. Электромеханика, 1989, № 2.
10. Попов В. И., Макаров Л.Н. К экспериментальному определению параметров схемы замещения асинхронной машины. – Электричество, 1993, № 1.
11. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А. Э. Кравчик и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
12. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: ГЭИ, 1969.
13. Регулируемые асинхронные двигатели в сельскохозяйственном производстве. Под ред. Д.Н. Быстрицкого. – М.: Энергия, 1975.
14. Казачковский Н.Н., Зворыкин В.Б., Козлов В.К. Определение параметров и характеристик асинхронных двигателей по данным каталога и опыта холостого хода. – Промышленная энергетика, 1988, № 10.
15. Бурунин О.А. Построение характеристик асинхронного двигателя по каталожным данным. – Электричество, 1994, № 7.