

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ
ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

В современных судовых асинхронных электроприводах используются различные преобразователи частоты (ПЧ), устройства плавного пуска (УПП) и системы регулирования напряжения (РН). Такие устройства должны обладать высокой надежностью. В связи с этим наиболее часто применяются простые конструкции с ограниченными функционально-сервисными возможностями. Например, в ряде ЧП и УПП ф. Lenze, ф. Веспер и множестве других отсутствуют встроенные алгоритмы идентификации параметров асинхронного двигателя (АД). Для таких устройств необходим непосредственный ввод во встроенную память основных параметров АД, в том числе и параметров схемы замещения (СЗ) фазы АД.

Эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя существенно зависят от всех введенных вручную параметров. Даже незначительные отклонения введенных параметров приводят к уменьшению диапазона регулирования скорости, иногда – к повышенному нагреву АД. Можно подчеркнуть и еще один важный факт: во всех без исключения ПЧ с автоматическим определением параметров АД встроенный алгоритм идентификации параметров закрыт для наладчика. Более того, у различных производителей этот алгоритм различен.

Параметры СЗ обычно рассчитываются на основе Т-образной схемы замещения и ее упрощенной, Г-образной (рис. 1) [1]. На рис. 1, б обозначено $Z_{\mu} = R_{\mu} + jX_{\mu}$ и $Z_1 = R_1 + jX_{1\sigma}$. Векторная диаграмма, соответствующая рис. 1, а, приведена на рис. 2.

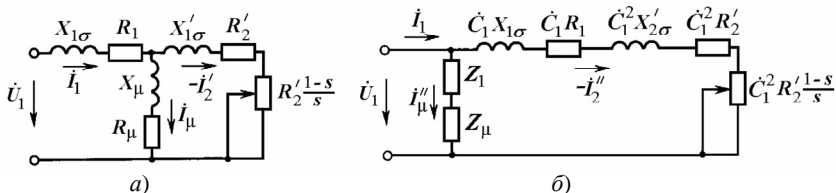


Рис. 1. Т- и Г-образные схемы замещения асинхронного двигателя

На рис. 2 с целью удобочитаемости приведенной векторной диаграммы, не выдержаны имеющие место в действительности масштабные соотношения между модулями напряжений, модулями токов и углами между ними.

Параметры СЗ могут быть найдены экспериментально [2, 3]: на основе опыта холостого хода - при отсутствии нагрузки на валу и различных значениях напряжения; опыта короткого замыкания - при обеспечении номинального, и более чем номинального, тока статора. Такие эксперименты требуют специального измерительного, регулирующего и иногда нагрузочного оборудования, а проведение экспериментов и измерений непосредственно на месте установки двигателя с присоединенным к нему механизмом часто невозможно. Известны методы идентификации параметров СЗ [2, 4] на основе решения уравнений состояния асинхронной машины. В [2, 3, 5] описаны специальные методики определения параметров, ряд авторов идентифицирует параметры СЗ, применяя итерационные методы [6, 7]. Указанные расчеты сложны для использования, поскольку требуют применения особых методик, знания обмоточных данных, размеров активной зоны и другой, малодоступной для решения прикладных задач информации о АД, и не всегда дают результаты, поддающиеся верификации.

Учитывая, что задачи моделирования, исследования динамических и статических свойств АД, входящих в состав разнообразных технологических объектов, также основаны на применении СЗ фазы АД, становится актуальным решение указанных идентификационных задач, особенно в условиях ограниченной информации о параметрах АД.

Таким образом, необходимо идентифицировать следующие параметры СЗ: R_1 , R_μ и R'_2 – активное сопротивление фазы статора, ветви намагничивания и активное, приведенное к статору, сопротивление ротора; $X_{1\sigma}$, $X'_{2\sigma}$ и X_μ – индуктивные сопротивления рассеяния фаз статора, ротора и ветви намагничивания.

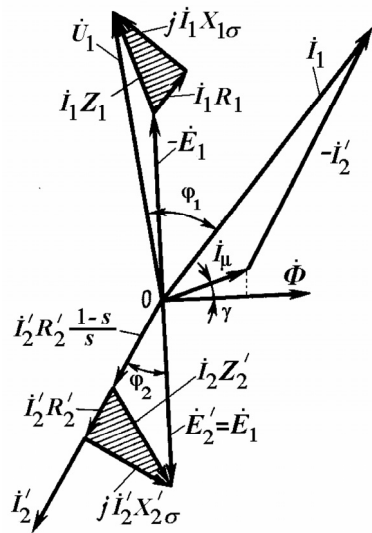


Рис. 2. Векторная диаграмма для Т-образной схемы замещения фазы АД

В настоящем исследовании параметры упрощенной СЗ АД определяются из ограниченных номинальных паспортных данных, характеризующих только основные свойства электродвигателя на рабочем участке механической характеристики, т.е. в режимах скольжений ротора меньших критических $s < s_k$. Учет уменьшения индуктивных сопротивлений рассеяния $X_{1\sigma}$ и $X'_{2\sigma}$, а также учет увеличения активного сопротивления R'_2 , связанных с насыщением путей рассеяния и с вытеснением тока в пазах ротора в режимах больших скольжений (пуско-тормозные режимы при $s > s_k$), должен вводиться отдельно и в данной постановке задачи не рассматривается.

В [1, 6] показано, что комплекс \dot{C} для АД мощностью 10 кВт и более можно заменить модулем $C \in 1,02 \dots 1,05$. После анализа публикаций [1, 9] и проведения ряда экспериментов установлено, что в большинстве предназначенных для практических приложений методик идентификации параметров СЗ, в том числе и в системах автоматической идентификации параметров СЗ в современных частотно-регулируемых электроприводах, часто используются упрощенные аналитические выражения. Например, для расчета тока холостого хода и критического скольжения s_k обычно принимается, что $C \approx 1$. В этом случае токи $I''_2 \approx I'_2$ и $I''_{\mu} \approx I_{\mu}$, а значением R_{μ} пренебрегают, поскольку обычно $R_{\mu} \ll X_{\mu}$ (см. рис. 2).

Каждый поставляемый производителем АД имеет соответствующие отраслевым стандартам характеристики и параметры, которые должны приводиться в каталогах. Но эти данные доступны редко и очень часто имеется возможность идентифицировать параметры АД только из минимума информации о двигателе, либо имея только ограниченные сведения, приведенные на табличке корпуса АД. Эти сведения можно представить следующим образом.

Действующие значения фазного напряжения $U_{1н}$ и тока статора $I_{1н}$, номинальная мощность $P_{2н}$, коэффициент полезного действия η_n , коэффициент мощности $\cos \varphi_n$, номинальная частота вращения n_n (номинальное скольжение s_n), кратность максимального момента $k_{\max} = M_{\max}/M_n$. Кроме того, иногда известны: кратности пускового момента k_n и пускового тока k_i , а также момент инерции J ротора двигателя.

Определим параметры СЗ АД на основе метода аналогий, по заранее заданному для номинального режима распределению потерь мощности в обмотках статора $\Delta P_{1н}$ и ротора $\Delta P_{2н}$. Применение метода аналогий с последующим распределением потерь мощности возможно только в том случае, если для известной (аналогичной) серии асин-

хронных двигателей имеется экспериментально подтвержденный опыт идентификации параметров СЗ или имеются подробные каталожные сведения [10].

Рассмотрим последовательность расчета параметров СЗ для широко применяющихся АД в малых холодильно-компрессорных, насосных и вентиляторных установках серий 4А и АИР для диапазона мощностей 0,09 ... 15 кВт.

Суммарные потери мощности на номинальном режиме работы АД

$$\Delta P_{\Sigma H} = P_{2H} / \eta_H - P_{2H}.$$

Номинальные потери в роторной цепи

$$\Delta P_{2H} = P_{2H} \cdot s_H / (1 - s_H).$$

Принимаем, что номинальные потери в цепи статора

$$\Delta P_{1H} = k_1 \cdot \Delta P_{\Sigma H} - \Delta P_{2H},$$

где k_1 – коэффициент, определяемый на основе экспертной оценки АД (для рассматриваемых АД серий 4А и АИР следует принимать $k_1 \in 0,68 \dots 0,75$).

Сопrotивление фазы статора

$$R_1 = \Delta P_{1H} / (3 \cdot I_{1H}^2).$$

Приведенное к статору сопротивление ротора:

$$R'_2 = \Delta P_{2H} / (3 \cdot I'^2_{2H}),$$

где I'_{2H} – номинальный приведенный ток ротора. Значение тока I'_{2H} для режима малых скольжений (см. рис. 2), в том числе для $s = s_H$, считаем равным активной составляющей номинального тока статора I_{1a_H} за вычетом тока ΔI_{ct_H} , идущего на покрытие номинальных потерь в стали ΔP_{ct_H} . Принимаем $\Delta P_{ct_H} = k_2 \cdot \Delta P_{\Sigma H}$, где $k_2 \in 0,22 \dots 0,28$ – коэффициент, определяемый на основе экспертной оценки АД. С учетом изложенного, номинальный приведенный ток ротора

$$I'_{2H} = I_{1H} \cdot \cos \varphi_H - \Delta P_{ct_H} / (3 \cdot U_{1H}).$$

Индуктивное сопротивление цепи взаимоиנדукции определяется по упрощенной формуле:

$$X_\mu = U_{1H} / (k_3 \cdot I_{1H} \cdot \sin \varphi_H),$$

где $k_3 \in 0,77 \dots 84$ - коэффициент, определяемый на основе экспертной оценки АД. Следует отметить, что упрощенная оценка X_μ не всегда однозначна. Поэтому, что особенно важно для других серий АД, следует воспользоваться иными формулами. Предлагаются выражения:

$$I_{\mu} = I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{s_H \cdot \cos \varphi_H}{s_K} \cdot \eta_H \right)$$

при $\eta_H > \cos \varphi_H$, и

$$I_{\mu} = I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{s_H \cdot \cos \varphi_H}{s_K} - \eta_H + \cos \varphi_H \right)$$

при $\eta_H \leq \cos \varphi_H$.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания определяется с помощью критического скольжения s_K

$$X_K = \sqrt{(R'_2/s_K)^2 - R_1^2}$$

Критическое скольжение

$$s_K = \frac{s_H \cdot (k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 + 2 \cdot s_H \cdot a \cdot (k_{\max} - 1) - 1})}{1 - 2 \cdot a \cdot s_H \cdot (k_{\max} - 1)},$$

где $a = R_1 / R'_2$.

Для определения критического скольжения асинхронных двигателей мощностью более 7,5 кВт можно использовать упрощенную формулу [1, 9]

$$s_K = s_H \cdot \left(k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - 1} \right).$$

Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и приведенной обмотки ротора:

$$X_{1\sigma} = k_4 \cdot X_K;$$

$$X'_{2\sigma} = (1 - k_4) \cdot X_K,$$

где $k_4 \in 0,38 \dots 0,45$ - коэффициент, определяемый на основе экспертной оценки АД.

При построении механических характеристик электромагнитный момент асинхронного двигателя [1, 9]

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_K \cdot f / f_H)^2 \right]},$$

где ω_0 - угловая скорость электромагнитного поля статора ($\omega_0 = 2\pi \cdot f / p_n$, рад/с; p_n - число пар полюсов двигателя); f и f_H - текущее и номинальное для АД значения частоты питающего напряжения, Гц.

Адекватность идентифицированных параметров СЗ проверялась сравнением с приведенными в [10] каталожными данными СЗ. На-

пример, в табл. 1, для некоторых двигателей серии 4А дано сравнение каталожных и рассчитанных по приведенной выше методике значений параметров СЗ:

4А56А2 с паспортными данными 3×220 В, $\eta_n = 0,66$, $\cos \varphi_n = 0,76$, $I_{1n} = 0,54$ А, $P_{2n} = 180$ Вт, $\omega_n = 288,9$ рад/с;

4А80А4 с паспортными данными 3×220 В, $\eta_n = 0,75$, $\cos \varphi_n = 0,81$, $I_{1n} = 2,74$ А, $P_{2n} = 1,1$ кВт, $\omega_n = 146,5$ рад/с;

4А132S4 с паспортными данными 3×220 В, $\eta_n = 0,875$, $\cos \varphi_n = 0,86$, $I_{1n} = 15,1$ А, $P_{2n} = 7,5$ кВт, $\omega_n = 152,3$ рад/с.

Параметры СЗ рассчитаны более чем для пятидесяти двигателей серии 4А с синхронными частотами вращения $1000, 1500$ и 3000 мин⁻¹ мощностью от $0,06$ до $15,0$ кВт. Сравнение каталожных данных с расчетными по предложенной методике дает относительные погрешности, не превышающие для машин мощностью:

до 1 кВт – 17 % для сопротивлений рассеяния и активных сопротивлений и погрешность не превышающую 18 %, для ветви намагничивания;

от 1 кВт до $15,0$ кВт – 13 % для сопротивлений рассеяния и активных сопротивлений и погрешность, не превышающую 15 %, для ветви намагничивания.

Очевидно, что такой разброс относительных погрешностей связан не только с представленной методологией идентификации параметров СЗ по ограниченному исходным данным, но и с особенностями, как проектирования, так и изготовления АД различных габаритов.

Рассчитанные параметры СЗ предлагается уточнять с помощью модели АД, записанной в координатах x - y . Теория такой модели АД подробно описана в [9], а ее реализация имеется во всех версиях среды моделирования *Matlab* [7]. Уточнение идентифицированных параметров СЗ АД осуществляется путем вариаций, в основном X_μ , R_1 и R'_2 , для рабочей точки, обеспечивающей номинальные условия функционирования АД.

Так, для АД 4А56А2 при параметрах СЗ $R_1 = 66$ Ом, $R'_2 = 44$ Ом, $X_1 = 22$ Ом, $X'_2 = 27$ Ом и $X_\mu = 590$ Ом для номинальной статической нагрузки $M_n = 0,62$ Нм и принятой мощности потерь в стали $\Delta p_{ст.н} = 23$ Вт обеспечиваются значения: $\omega = 288,9$ рад/с, $I_1 = 0,51$ А, $\cos \varphi = 0,787$ и $\eta = 0,666$.

Для АД 4А80А4 при параметрах СЗ $R_1 = 9,2$ Ом, $R'_2 = 6,2$ Ом, $X_1 = 6,0$ Ом, $X'_2 = 8,9$ Ом и $X_\mu = 140$ Ом для номинальной статической на-

грузки $M_n = 7,51$ Нм и принятой мощности потерь в стали $\Delta p_{стн} = 93$ Вт обеспечиваются значения: $\omega = 146,5$ рад/с, $I_1 = 2,72$ А, $\cos \varphi = 0,813$ и $\eta = 0,744$.

Таблица 1

Сравнение параметров СЗ для различных габаритов АД

Параметр	Каталожное значение параметров АД, Ом			Идентифицированное значение параметров АД, Ом		
	4А56А2	4А80А4	4А132S4	4А56А2	4А80А4	4А132S4
R_1	68,87	9,22	0,68	60	8,2	0,78
R'_2	38,08	5,1	0,46	42	5,9	0,49
X_1	21,07	6,0	1,21	25	6,6	1,39
X'_2	27,14	8,83	1,79	32	8,4	1,9
X_μ	810	136	43,7	760	155	39

Для АД 4А132S4 при параметрах СЗ $R_1 = 0,7$ Ом, $R'_2 = 0,46$ Ом, $X_1 = 1,8$ Ом, $X'_2 = 2,0$ Ом и $X_\mu = 41$ Ом для номинальной статической нагрузки $M_n = 49,2$ Нм и принятой мощности потерь в стали $\Delta p_{стн} = 270$ Вт обеспечиваются значения: $\omega = 152,3$ рад/с, $I_1 = 14,91$ А, $\cos \varphi = 0,858$ и $\eta = 0,885$.

Как видно из результатов уточнения параметров СЗ АД, практически все установившиеся значения переменных близки к номинальным, что позволяет проводить не только модельные исследования систем управления АД, гарантирующие получение результатов, адекватных экспериментальным, но и вводить достоверные параметры в ПЧ, УПП и РН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические машины и микромашины: учеб. для электротехн. спец. вузов / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1990. - 528 с.
2. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока: новые экспериментальные методы. - К.: Техника, 1992. -168 с.
3. Родькин Д.И., Черный А.П., Здор И.Е. Задачи и технические средства для диагностики параметров асинхронных двигателей //

Вісник ХДПУ. – 1999. – №61. – С. 67 - 73.

4. Бешта О.С., Балахонцев О.В., Худолій С.С. Ідентифікація опорів обмоток асинхронного двигуна в робочому режимі за допомогою універсальної дискретної моделі струму статора // Вісник ХДПУ. – 2002. – №1(12). – С. 295 - 297.

5. Чекунов К.А. Судовые электроприводы и электродвижение судов. – Л.: Судостроение, 1976. - 376 с.

6. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск: Техноперспектива, 2006. - 363 с.

7. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. -320 с.

8. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38 - 42.

9. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 560 с.

10. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. - 504 с.