

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ С ФУНКЦИЕЙ «SELF-COMMISSIONING»

*Черный А.П., д.т.н., проф., Герасимович В.В., асп.,
Лашко Ю.В., к.т.н., доц.*

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
39600, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

E-mail: apch@polytech.poltava.ua

Воробейчик О.С., инж.

ООО «Семиол», г. Кривой Рог

Berdai Abdelmajid

Université Hssan II Ain Chock, ENSEM

Route d'El Jadida Km 8, BP 8118 Oisis, Casablanca, Maroc

E-mail: a.berdai@gmail.com

Розглянуто метод визначення параметрів асинхронного двигуна під час його пуску. Розрахунок активного і індуктивного опорів короткого замикання виконується на основі даних аперіодичної і періодичної складових струму статора. Запропоновані прості аналітичні вирази для розрахунків та визначено похибки отриманих параметрів.

Ключові слова: параметри, асинхронний двигун, струм статора

The method of parameters determination of asynchronous motor while it starts has been considered. The executed calculation of active and inductive short circuit resistances is based on the data received from aperiodic and periodic components of stator current. Simple analytical expressions for calculation have been proposed and accuracy of the received parameters has been determined.

Key words: parameters, asynchronous motor, stator current

Введение. Реализация алгоритмов управления электромеханическими системами с асинхронными двигателями (АД) требует знания параметров электрических машин. Некоторые из них могут быть рассчитаны на основании каталожных данных или определены экспериментально с использованием специального оборудования, что, в большинстве случаев, невозможно в условиях реального внедрения. Поэтому одной из стандартных функций современных асинхронных электроприводов является определение параметров АД при инициализации системы. Большинство зарубежных производителей асинхронных электроприводов имеют в своих изделиях эту функцию, получившую название “self-commissioning”. Идентификация электрических параметров АД осуществляется на неработающем технологическом оборудовании, обычно на невращающемся двигателе или вращающемся с постоянной скоростью. Использование этой функции в системах защиты позволит устанавливать необходимые уставки для конкретного двигателя, а также изменять их, если параметры АД изменяются в процессе эксплуатации или ремонта.

Этому вопросу посвящено достаточно большое количество зарубежных исследований. Вместе с тем определенного, теоретически обоснованного

решения рассматриваемой проблемы до настоящего времени не найдено.

Анализ предыдущих исследований. В [1] сделан подробный анализ методов определения параметров АД для использования в системах управления двигателями. В [2] приведен алгоритм, основанный на свойстве линейности модели электрической части АД при постоянной скорости. В предположении о возможности получения высших производных тока статора, может быть сформирована модель с линейной параметризацией, для которой применим метод наименьших квадратов. Расширенный фильтр Калмана применен в [3]. В [4] авторами предложен алгоритм оценивания активных сопротивлений статора и ротора (остальные параметры предполагаются известными) при работающем АД. В [5] использован метод частотных характеристик для решения задач идентификации. Теория адаптивных систем с задающей моделью применена в [6]. Решение [7] также использует этот подход, но базируется на специальной структуре параллельного адаптивного наблюдателя с расширенным вектором пространства состояния.

В алгоритме [7] ни один из параметров электрической части АД не требуется знать изначально. Дополнительно, наблюдатель [7] дает информацию о потоке АД в процессе теста

идентификации. Это позволяет избежать ложной оценки параметров, что может быть вызвано явлением магнитного насыщения. Недостатком метода [7] является сложность его структуры и настройки параметров.

Анализ источников, посвященных вопросам определения параметров асинхронных двигателей, указывает на отсутствие простого и надежного метода, который позволял бы с достаточной точностью определять все параметры схемы замещения, включая эквивалентные параметры, характеризующие составляющие потерь в стали статора и ротора [8-10]. Отсутствие достоверных методик для диагностирования параметров, как показывает анализ, обусловлено стремлением получить результаты из простейших схем замещения.

Выполненный анализ указывает на отсутствие единого подхода к определению параметров двигателей, который позволил бы для любой, возникающей на практике задачи, найти вариант ее решения. Достаточно просто можно убедиться и в том, что отсутствует корректно сформулированный перечень наиболее важных и часто встречающихся практических задач определения параметров. Важно иметь в виду, что как в условиях испытательных станций, так и в условиях производства с развитой системой асинхронных регулируемых и нерегулируемых электроприводов, перечень задач диагностики, привязанных к конкретным производственным задачам или нормативным документам, отсутствует. Регламент испытаний, как правило, ограничивается минимумом данных и параметров, устанавливаемых, исходя не из потребностей производства, а из возможностей испытательного оборудования. Полный перечень необходимых данных может быть получен при использовании полнокомплектных испытательных комплексов.

Уровень развития вычислительных систем и средств преобразовательной техники позволяет в настоящее время решить практически любую из задач диагностики параметров асинхронных двигателей [11]. В методологическом плане требуются уяснения как постановка задач, так и методы их решения.

Целью исследований является разработка метода определения параметров схемы замещения АД при его пуске для настройки систем защиты.

Материал и результаты исследований. Условие определения параметров АД при пуске существенно упрощает задачу расчета, так как в этом случае можно принять, что АД в момент пуска (подключения к сети) подобен трансформатору в режиме короткого замыкания.

В качестве дополнительных допущений примем:

- магнитную цепь считаем ненасыщенной, а, следовательно, индуктивные сопротивления обмоток являются постоянными величинами;
- пренебрегаем током холостого хода, так как, например, для мощных двигателей он примерно на порядок меньше пускового тока.

Система операторных уравнений, описывающая процессы при пуске:

$$\begin{bmatrix} U_I(s) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + sx_1 & sx_\mu \\ sx_\mu & R_2 + sx_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

С учетом активного сопротивления статора переходный процесс является затухающим во времени. Для упрощения решения примем, что $I_1(s) = -I_2(s)$, тогда система (1) имеет вид [12]:

$$\begin{aligned} U_I(s) &= (R_1 + sx_1)I_1(s) - sx_\mu I_2(s); \\ 0 &= sx_\mu I_1(s) - (R_2 + sx_2)I_2(s). \end{aligned} \quad (2)$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$U_I(s) = (R_1 + sx_1 + R_2 + sx_2 - 2sx_\mu)I_1(s),$$

откуда

$$\begin{aligned} I_1(s) &= \frac{U_I(s)}{R_1 + R_2 + s(x_1 - x_\mu) + s(x_2 - x_\mu)} = \\ &= \frac{U_I(s)}{R_1 + R_2 + s(x_{1\sigma} + x_{2\sigma})}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_{1\sigma} = x_1 - x_\mu$; $x_{2\sigma} = x_2 - x_\mu$ - индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора.

Обозначим $R_1 + R_2 = R_k$; $x_{1\sigma} + x_{2\sigma} = x_k$ - активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания двигателя соответственно.

С учетом синусоидального питающего напряжения можно получить изображение тока статора в виде [12]:

$$\begin{aligned} I_1(s) &= \sum_{k=1}^n U_I \frac{(s_k \cos(\alpha_0) + s_k^2 \sin(\alpha_0))e^{s_k t}}{s_k(3s_k^2 + 1)x_k + 2s_k R_k} = \\ &= U_I \sum_{k=1}^n \frac{(\cos(\alpha_0) + s_k \sin(\alpha_0))e^{s_k t}}{(3s_k^2 + 1)x_k + 2s_k R_k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Оригинал выражения (4) после преобразований получим в виде

$$\begin{aligned} I_1(t) &= U_I \left[\frac{R_k}{R_k^2 + x_k^2} \left[\sin(\omega_0 t + \alpha_0) - \frac{x_k}{R_k} \cos(\omega_0 t + \alpha_0) \right] - \right. \\ &\left. - \left(\sin(\alpha_0) - \frac{x_k}{R_k} \cos(\alpha_0) \right) e^{-\frac{t}{T_k}} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая, что $\frac{x_k}{R_k} = \operatorname{tg}(\varphi_k)$, получим:

$$I_1(t) = \frac{U_I}{\sqrt{R_k^2 + x_k^2}} \left[\sin(\omega_0 t + \alpha_0 - \varphi_k) - \sin(\alpha_0 - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T_k}} \right] \quad (6)$$

Анализируя (6) видно, что уравнение содержит две составляющие: аperiodическую и периодическую.

Решая систему уравнений для аperiodической составляющей

$$\left. \begin{aligned} I_a(t_1) &= I_a e^{-\frac{t_1}{T_k}} \\ I_a(t_2) &= I_a e^{-\frac{t_2}{T_k}} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

найдем:

$$T_k = -\omega_0 \frac{t_1 - t_2}{\ln \left(\frac{I_a(t_1)}{I_a(t_2)} \right)}; \quad (8)$$

$$I_a = \frac{I_a(t_2)}{e^{\frac{t_2}{T_k}} - e^{\frac{t_1}{T_k}}}$$

где T_k - постоянная времени; I_a - максимальное значение апериодического тока в момент включения двигателя; $I_a(t_1)$, $I_a(t_2)$ - значения апериодического тока в моменты времени t_1 , t_2 . Моменты времени t_1 , t_2 соответствуют первому и второму максимальным значениям тока статора после включения (рис.1).

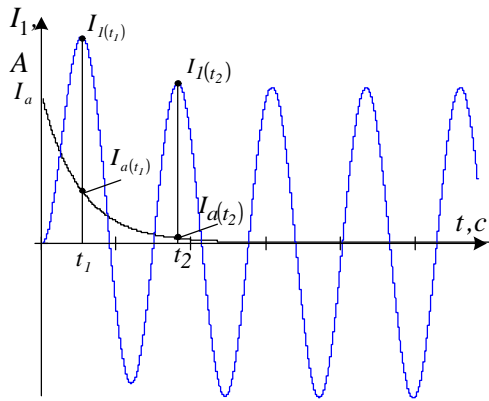


Рисунок 1 – Токи статора при включении АД

Анализ временных зависимостей напряжения и тока позволяет определить как начальный угол включения напряжения α_0 , так и фазный угол тока φ_k (рис.2).

Теперь из решения уравнения (6) для периодической составляющей тока:

$$I_1(t_1) - \frac{U_1}{\sqrt{R_k^2(I+T_k^2)}} [\sin(\omega_0 t_1 + \alpha_0 - \varphi_k)] = I_a(t_1); \quad (9)$$

$$I_1(t_2) - \frac{U_1}{\sqrt{R_k^2(I+T_k^2)}} [\sin(\omega_0 t_2 + \alpha_0 - \varphi_k)] = I_a(t_2),$$

определим R_k :

$$R_k = \frac{I}{\sqrt{I+T_k^2}} \sin(\omega_0 t_1 - \alpha_0 - \varphi_k) \frac{U_1}{I_1(t_1) - I_a(t_1)}.$$

Окончательно активное сопротивление

$$R_2 = R_k - R_1, \quad (10)$$

причем R_1 - определено ранее при питании обмоток

статора постоянным током.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = T_k R_k. \quad (11)$$

Аналитическую проверку метода определения параметров схемы замещения выполним для АД, данные которого приведены в табл.1.

Для расчета предлагаемым методом используем фрагмент временной зависимости токов статора при пуске (рис.3).

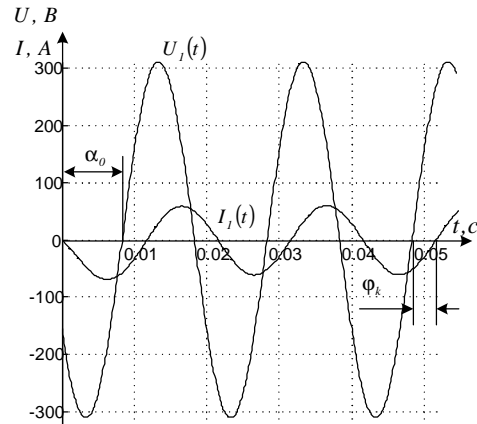


Рисунок 2 – Временные зависимости напряжения и тока АД

Таблица 1 – Паспортные данные исследуемого АД

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	380
Число пар полюсов	2
Активное сопротивление статора, Ом	1,35
Приведенное активное сопротивление ротора, Ом	1,39
Индуктивность контура намагничивания, Гн	0,27
Индуктивное сопротивление рассеяния статора, Ом	2,13
Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора, Ом	2,3
Момент инерции, кг м ²	0,2

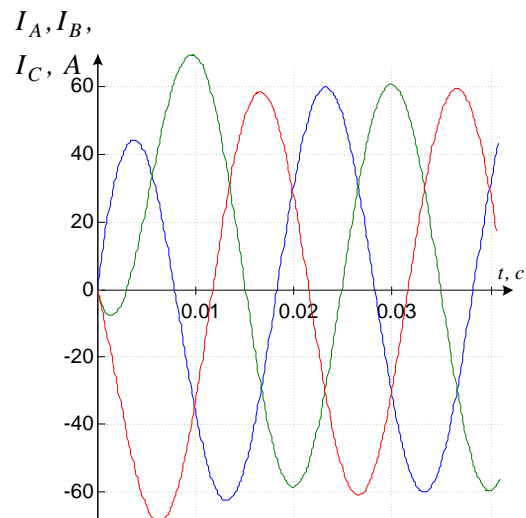


Рисунок 3 – Временные зависимости токов статора при пуске АД

Значения токов статора, значений времени и значений составляющих аperiodического тока приведены в табл.2.

Таблица 2 – Данные для расчета параметров АД

Время	Ток	
	$I_l(t), A$	$I_a(t), A$
0,00632	68,85	8,05
0,02658	60,951	0,151
0,04659	60,801	0,001

Результаты расчета параметров АД приведены в табл.3.

Таблица 3 – Результаты расчета параметров АД

Параметр	Значение
Постоянная времени T_k, c	0,005095
Начальный угол включения напряжения $\alpha_0, рад$	0,534071
Фазный угол тока $\varphi_k, рад$	1,036726
Активное сопротивление короткого замыкания $R_k, Ом$	2,70071
Приведенное активное сопротивление ротора $R_2, Ом$	1,35071
Относительная ошибка определения сопротивления ротора, %	2,83
Индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_k, Ом$	4,323194
Относительная ошибка определения индуктивного сопротивления короткого замыкания, %	2,41

Выводы. Предложенный метод является одним из наиболее простых среди методов определения параметров схемы замещения АД в режиме короткого замыкания. Его преимуществом является возможность определять параметры АД при каждом пуске без вывода двигателя из технологического процесса или применения специализированных устройств. Для определения параметров используются сигналы фазных токов и напряжений на интервале времени до 0,1 с. Ошибка определения приведенного активного сопротивления ротора не превышает 3%, а индуктивного сопротивления короткого замыкания – 2,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пересада С.М., Серета А.Н. Оценка параметров асинхронных двигателей при известном активном сопротивлении статора. // Вісник національного технічного університету "Харківсь-

кий політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХП", 2004, №43. – С. 28-31.

2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1984. – 428с.

3. Stephan Jennifer, Bodson Marc. Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 1994, may/june. – Vol. 30, N 3. P. 746-759.

4. Iwasaky T., Kataoka T. Application of an extended kalman filter to parameter identification of an induction motor // IEEE, Industry Application Society Annual Meeting. – 1989. – Vol.1. – P. 248-253.

5. Marino R., Peresada S., Tomei P. On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors // IEEE, Transaction on control system technology. – 2000. – Vol. 8. – P. 248-253.

6. Bilate A., Grotstollem H. Parameter identification of inverter fed induction motor at standstill with correlation method, proc. of 5th European Conference on Power Electronics and Applications. – 1993. – vol.5. – P. 97-102.

7. Buja G.S., Menis R., Valla I. MRAS identification of the induction motor parameters in PWM inverter drives at standstill, Proc. of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. – 1995.

8. Родькин Д.И., Черный А.П., Здор И.Е. Задачи диагностики параметров асинхронных двигателей при испытаниях и в системах промышленного привода. // Проблеми створення нових машин і технологій (Кременчуцький державний політехнічний інститут) – Кременчуг: КГПИ. – 1999. – Вип.1(6). – С. 76-78.

9. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1996. – 144с.

10.Родькин Д.И., Здор И.Е., Черный А.П. Инженерные методы определения параметров асинхронных двигателей // Проблеми створення нових машин і технологій (Кременчуцький державний політехнічний інститут) – Кременчуг: КГПИ. – 1999. – Вип.1. – С. 16-22.

11.Здор И.Е., Мосьпан В.А. Анализ методов диагностики асинхронных короткозамкнутых двигателей. // Проблеми створення нових машин і технологій: Збірник наукових праць КДПУ. – 1998. – Вип.2.

12.Электрические машины (специальный курс): Учеб. для вузов по спец. «Электрические машины»/ Г.А.Сипайлов, Е.В.Кононенко, К.А.Хорьков – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.

Стаття надійшла 18.07.2008 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Кореньковою Т.В.