

УДК 621.313.

**А. С. Коваль, канд. техн. наук, доц., А. В. Шваяков**

## **К ВОПРОСУ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В статье предложен метод определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя, который можно использовать при создании математической модели асинхронного двигателя для современных систем управления электроприводом.

В современных регулируемых электроприводах существует необходимость определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя (АД), которые необходимы для работы эталонных моделей [1, 2]. Как правило, в таких приводах выполняются функции предварительной идентификации параметров АД до начала работы электропривода. Сведения о применяемых алгоритмах идентификации в технической документации отсутствуют.

В отечественной и зарубежной технической литературе освещены разнообразные методы определения параметров АД, каждый из которых имеет свои достоинства, недостатки и область применения. В работах [3, 4] предложены варианты классификации известных методов идентификации электромагнитных параметров асинхронных и синхронных машин. Известные методы идентификации являются нетехнологичными с точки зрения сложности испытательного оборудования, трудоемкости проведения опытов и обработки данных.

В [5–9] предложены методы идентификации, позволяющие с приемлемой точностью подойти к определению параметров эталонных моделей.

В [5] для идентификации параметров АД выполняются три опыта:

- определение омического сопротивления статорной цепи;
- опыт короткого замыкания;
- определение промежуточного параметра.

Но определение промежуточного параметра предполагает разгон АД до определенной скорости, что может являться недопустимым по технологическим соображениям, и наличие специализированного стендового оборудования.

В [6] для определения параметров АД снимается кривая затухания тока при отключении обмотки статора от сети переменного тока, а также выполняется определение эквивалентной индуктивности, активного и индуктивного сопротивления при фиксированной частоте. Полученная система нелинейных уравнений решается численным методом.

В [9] идентификация параметров АД выполняется в двух режимах:

- 1) режим постоянного тока, для определения активного сопротивления статора и индуктивности статора;
- 2) режим предварительного намагничивания, для определения сопротивления ротора.

Рассмотрим способ идентификации параметров неподвижного АД в основе которого лежат методы определения сопротивления статора постоянным током, метод короткого замыкания и дополнительно, для определения индуктивностей статора, ротора и индуктивности главного магнитного контура, снимается переходная характеристика тока статора.

Схема замещения АД при неподвижном роторе представлена на рис. 1 [10].

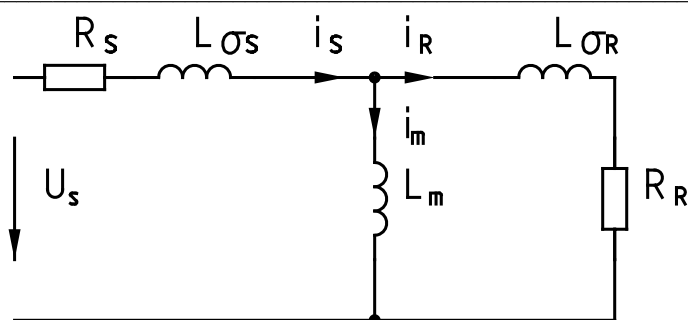


Рис. 1. Схема замещения АД при неподвижном роторе

Комплексное сопротивление схемы замещения  $Z(p)$ , представленной на рис. 1, можно определить по формуле

$$Z(p) = R_s + p \cdot L_{\sigma s} + \frac{p \cdot L_m \cdot (R_R + p \cdot L_{\sigma R})}{p \cdot L_m + R_R + p \cdot L_{\sigma R}}, \quad (1)$$

где  $R_s$  – сопротивление статора, Ом;  $p$  – оператор Лапласа;  $L_{\sigma s}$  – индуктивность рассеивания статора, Гн;  $L_m$  – индуктивность главного магнитного контура, Гн;  $R_R$  – сопротивление ротора, Ом;  $L_{\sigma R}$  – индуктивность рассеивания ротора, Гн.

Тогда передаточную функцию АД при неподвижном роторе, можно определить по формуле

$$W(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{L_R \cdot p + R_R}{(L_s \cdot L_R - L_m^2) \cdot p^2 + (R_s \cdot L_R + R_R \cdot L_s) \cdot p + R_s \cdot R_R}, \quad (2)$$

где  $I(p)$  – изображение тока статора АД;  $U(p)$  – изображение напряжения статора АД;  $L_R$  – полная индуктивность ротора, Гн;  $L_s$  – полная индуктивность статора, Гн.

Алгоритм предварительной идентификации включает в себя следующие этапы.

Определение активного сопротивления статора. Для неподвижного АД в режиме стабилизации постоянного тока статора измеряется напряжение. Затем определяется значение активного сопротивления статора

$$R_s = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}, \quad (3)$$

где  $U_{DC}$  – падение напряжения на активном сопротивлении статора, В;  $I_{DC}$  – значение стабилизированного постоянного тока, А.

Для определения сопротивления ротора выполняется опыт короткого замыкания. Уравнения баланса мощности при неподвижном роторе АД примут вид [10]:

$$P = P_s + P_R, \quad (4)$$

где  $P$  – мгновенная потребляемая мощность в режиме короткого замыкания, Вт;  $P_s$  – активная мощность, рассеиваемая на сопротивлении статора, Вт;  $P_R$  – активная мощность, рассеиваемая на сопротивлении ротора, Вт.

В неподвижной системе координат значение мгновенной активной мощности

определяется по формуле [10]

$$P = \frac{m}{2} \cdot (u_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + u_{s\beta} \cdot i_{s\beta}), \quad (5)$$

где  $m$  – число фаз;  $u_{s\alpha}$ ,  $u_{s\beta}$  – проекция вектора напряжения статора на соответствующие оси, В;  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  – проекция вектора тока статора на соответствующие оси, А.

Пренебрегаем значением тока намагничивания, т.к.  $L_M = \infty$ ,  $i_m \approx 0$  [7], тогда эквивалентная схема замещения неподвижного АД примет вид (рис. 2).

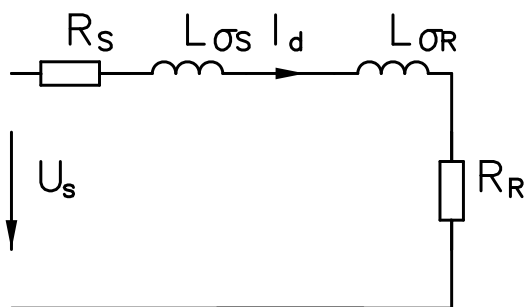


Рис. 2. Схема замещения неподвижного АД для опыта короткого замыкания

Значения активных мощностей, рассеиваемых на сопротивлениях статора и ротора, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} P_s &= m \cdot I_d^2 \cdot R_s; \\ P_r &= m \cdot I_d^2 \cdot R_r, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $I_d$  – действующее значение тока статора, А.

Значение действующего тока статора можно определить через его проекции на соответствующие оси системы координат по формуле

$$I_d = \sqrt{\frac{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}{2}}. \quad (7)$$

Тогда значение сопротивления ротора можно определить по формуле

$$R_r = \frac{P - P_s}{m \cdot I_d^2} = \frac{0.5 \cdot (u_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + u_{s\beta} \cdot i_{s\beta}) - 0.5 \cdot (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) \cdot R_s}{0.5 \cdot (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2)} = \frac{(u_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + u_{s\beta} \cdot i_{s\beta})}{(i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2)} - R_s. \quad (8)$$

Результаты расчета суммы активных сопротивлений статора и ротора сведены в табл. 1 (двигатель 4A112M4 [11]).

Для определения значений индуктивностей сделаем допущение о равенстве индуктивностей рассеивания статора и ротора  $L_{\sigma s} \approx L_{\sigma r}$ . Данное допущение вносит погрешность не превышающую 1 % [5]. Определение значений индуктивностей схемы замещения АД возможно по переходной характеристике [12]. Характер переходного процесса определяется корнями характеристического уравнения

$$(L_S \cdot L_R - L_m^2) \cdot \lambda^2 + (R_S \cdot L_R + R_R \cdot L_S) \cdot \lambda + R_S \cdot R_R = 0. \quad (9)$$

Табл. 1. Результаты расчета суммы активных сопротивлений статора и ротора

| Значение суммы $R_S + R_R$ | Значение |
|----------------------------|----------|
| Каталожное                 | 2,2420   |
| Расчетное                  | 2,2437   |

Общий вид переходной характеристики, определяемой корнями характеристического уравнения (9) описывается формулой [6]

$$y(t) = A_0 + A_1 \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t}, \quad (10)$$

где  $y(t)$  – зависимость выходной величины от времени;  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  – постоянные коэффициенты;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – корни характеристического уравнения (9).

Корни характеристического уравнения (9) связаны с параметрами схемы замещения неподвижного АД следующим образом:

$$\lambda_1 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{R_S \cdot L_R + R_R \cdot L_S + \sqrt{R_S^2 \cdot L_R^2 - 2 \cdot R_S \cdot L_R \cdot R_R \cdot L_S + R_R^2 \cdot L_S^2 + 4 \cdot R_S \cdot R_R \cdot L_m^2}}{L_S \cdot L_R - L_m^2};$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{R_S \cdot L_R + R_R \cdot L_S - \sqrt{R_S^2 \cdot L_R^2 - 2 \cdot R_S \cdot L_R \cdot R_R \cdot L_S + R_R^2 \cdot L_S^2 + 4 \cdot R_S \cdot R_R \cdot L_m^2}}{L_S \cdot L_R - L_m^2}. \quad (11)$$

При этом предпочтительно снимать переходную характеристику при переходе из режима стабилизации постоянного тока к нулевому значению тока, как показано на рис. 3. В этом случае коэффициент  $A_0$  обращается в ноль. А сама кривая тока свободна от коммутационных гармоник.

По снятой переходной характеристике, возможно определить значения корней характеристического уравнения (9). Для определения корней характеристического уравнения (9) по массиву данных можно применить численный метод Нелдера–Мида [13] или рекуррентный метод наименьших квадратов, работающий в режиме реального времени [14, 15]. В табл. 2 приведены значения корней характеристического уравнения, определенных методом Нелдера–Мида по кривой затухания тока, представленной на рис. 3. На рис. 4 показан процесс отыскания коэффициентов дискретной модели неподвижного АД рекуррентным методом наименьших квадратов. Результаты расчета коэффициентов сведены в табл. 3.

Табл. 2. Результаты расчета корней характеристического уравнения

| Значение корней характеристического уравнения | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ |
|---|-------------|-------------|
| Рассчитанных по каталожным данным             | 3,418       | 179,472     |
| Рассчитанных по кривой затухания тока         | 3,417       | 179,471     |

Табл. 3. Результаты расчета коэффициентов дискретной модели АД

| Коэффициент дискретной модели АД | Каталожный | Расчетный |
|----------------------------------|------------|-----------|
| Значение коэффициента $q_{A1}$   | - 1,8320   | - 1,8078  |
| Значение коэффициента $q_{A2}$   | + 0,8327   | + 0,8096  |
| Значение коэффициента $q_{B1}$   | + 0,07527  | + 0,0753  |
| Значение коэффициента $q_{B2}$   | - 0,07487  | - 0,0741  |

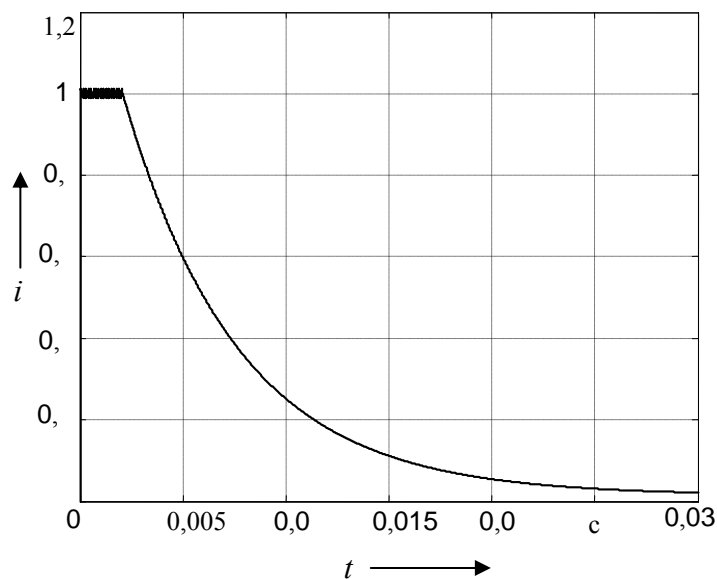


Рис. 3. Кривая тока при переходе из режима постоянного тока к нулевому току:  $t$  – время;  $i$  – кривая тока

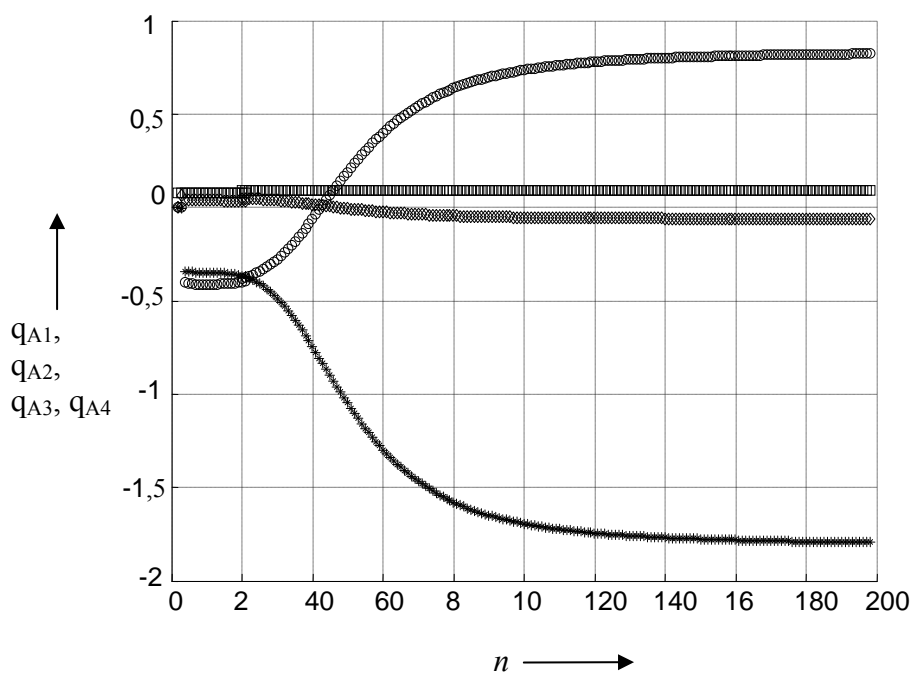


Рис. 4. Процесс отыскания коэффициентов дискретной модели неподвижного АД:  $q_{A1}$ ,  $q_{A2}$ ,  $q_{A3}$ ,  $q_{A4}$  – значения коэффициентов;  $n$  – номер шага

Для корней характеристического уравнения (9) можно записать следующие соотношения, при учете что  $L_S = L_R = L$  [5]

$$\begin{aligned}
 (\lambda_1 + \lambda_2) &= \frac{(R_S + R_R) \cdot L}{L^2 - L_m^2}; \\
 \lambda_1 \cdot \lambda_2 &= \frac{R_R \cdot R_S}{L^2 - L_m^2},
 \end{aligned}
 \quad (12)$$

Используя соотношение (12) легко определить значения  $L$  и  $L_m$ :

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \cdot \frac{R_R \cdot R_S}{(R_S + R_R)}; \\
 L_m &= \sqrt{L^2 - \frac{R_R \cdot R_S}{\lambda_1 \cdot \lambda_2}}.
 \end{aligned}
 \quad (13)$$

Значения коэффициентов дискретной модели АД с параметрами схемы замещения АД связаны соотношениями, при учете допущения  $L_S = L_R = L$  [5]

$$\begin{aligned}
 q_{A1} &= -\frac{(R_S + R_R) \cdot L \cdot T_s + 2 \cdot (L^2 - L_m^2)}{(L^2 - L_m^2) + (R_S + R_R) \cdot L \cdot T_s + R_S \cdot R_R \cdot T_s^2}; \\
 q_{A2} &= \frac{L^2 - L_m^2}{(L^2 - L_m^2) + (R_S + R_R) \cdot L \cdot T_s + R_S \cdot R_R \cdot T_s^2}; \\
 q_{B1} &= -\frac{L \cdot T_s}{(L^2 - L_m^2) + (R_S + R_R) \cdot L \cdot T_s + R_S \cdot R_R \cdot T_s^2}; \\
 q_{B2} &= \frac{(R_R \cdot T_s + L) \cdot T_s}{(L^2 - L_m^2) + (R_S + R_R) \cdot L \cdot T_s + R_S \cdot R_R \cdot T_s^2},
 \end{aligned}
 \quad (14)$$

где  $T_s$  – период дискретизации, с.

Результаты определения параметров эквивалентной схемы замещения неподвижного АД сведены в табл. 4.

Табл. 4. Результаты расчета параметров АД

| Параметр | Каталожное значение | Определенное значение | Ошибка, % |
|----------|---------------------|-----------------------|-----------|
| $R_S$    | 1,3200              | 1,3406                | 1,56      |
| $R_R$    | 0,9220              | 0,9031                | 2,0490    |
| $L_m$    | 0,1640              | 0,1632                | 0,4878    |
| $L_S$    | 0,1690              | 0,1695                | 0,2959    |
| $L_R$    | 0,1715              | 0,1695                | 1,1662    |

Таким образом, предложенный метод позволяет достаточно точно определять параметры схемы замещения АД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козярук, А. Е.** Математическая модель системы прямого управления моментом асинхронного электропривода / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков // Электротехника. – 2005. – № 9. – С. 8-14.

2. **Vas, P.** Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drivers / P. Vas. – Oxford : University Press, 1998. – 620 с. : ил.
3. **Рогозин, Г. Г.** Определение электромагнитных параметров машин переменного тока / Г. Г. Рогозин. – Киев : Техніка, 1992. – 168 с. : ил.
4. **Здор, И. Е.** Анализ методов диагностики асинхронных короткозамкнутых двигателей / И. Е. Здор, В. А. Мосьпан, Д. И. Родькин // Проблемы создания новых машин и технологий : науч. тр. КГПИ. – Кременчуг, 1998. – Вып. 2. – С 1-7.
5. **Величко, Г. В.** Метод идентификации параметров асинхронных трехфазных двигателей ориентированных на использование в автоматизированном электроприводе / Г. В. Величко // Станкин. – 1991. – № 5. – С. 9-15.
6. **Калинов, А. П.** Использование вентильных схем для определения электромагнитных параметров машин переменного тока / А. П. Калинов // Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 3. – С. 58-66.
7. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / И. П. Копылов [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002. – 757 с. : ил.
8. **Соколов, М. М.** Метод экспериментального определения параметров асинхронного двигателя / М. М. Соколов, Л. Б. Масандилов, В. Н. Грасевич // Электротехника. Энергия. – 1973. – № 5. – С. 26-29.
9. **Браславский, И. Я.** Адаптивная система прямого управления моментом асинхронного двигателя / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, Е. И. Барац // Электротехника. – 2001. – № 1. – С. 35-39.
10. **Браславский, И. Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М. : Академия, 2004. – 256 с. : ил.
11. **Копылов, И. П.** Математическое моделирование электрических машин : учебник для вузов / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с. : ил.
12. **Гроп, Д.** Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М. : Мир, 1979. – 305 с. : ил.
13. **Мэтьюз, Д. Г.** Численные методы. Использование MATLAB : пер. с англ. / Д. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк. – М. : Вильямс, 2001. – 720 с. : ил.
14. **Льонг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя : пер. с англ./ Л. Льонг ; под ред. Я. З. Цыпкина. – М. : Наука, 1991. – 432 с. : ил.
15. **Гарганеев, А. Г.** Идентификация параметров асинхронного двигателя / А. Г. Гарганеев, С. В. Ланграф, А. Т. Яровой // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : тр. II науч. конф. – М., 2004. – Ч. 3. – С. 940-945.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 22.02.2006

**A.S. Koval, A.V. Shvayakov**  
**Parameters identification of induction machine**  
Belarusian-Russian University

The article presents parameter determination method of induction machine equivalent scheme. This method may be used for designed mathematical models induction machine for modern control system.