

УДК: 621.313.004

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ПИТАНИИ СТАТОРА

**А. С. Бешта, А. А. Сёмин**

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»

просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49027, Украина. E-mail: beshtaa@nmu.org.ua, syomin\_andrew@mail.ru

Целью работы является обоснование возможности проведения процедуры идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя при неподвижном роторе. Используются методы описания электромагнитных процессов, известные из теории электрических машин. Получены выражения, которые позволяют определять параметры схемы замещения асинхронного двигателя, использующие в качестве исходной информации данные опытов несимметричного питания на постоянном и переменном токе. Приведены как полная, так и упрощенная системы уравнений для проведения идентификации параметров. Показано, что при низких частотах определение параметров на основе упрощенной системы уравнений является недопустимым. Приведенные в работе выражения могут служить основой для разработки алгоритмов и программ микропроцессорных систем приводов переменного тока с асинхронным двигателем при идентификации параметров схемы замещения.

**Ключевые слова:** идентификация, асинхронный двигатель, схема замещения.

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ ЖИВЛЕННІ СТАТОРА

**О. С. Бешта, А. О. Сьомін**

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»

просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49027, Україна. E-mail: beshtaa@nmu.org.ua, syomin\_andrew@mail.ru

Метою дослідження є обґрунтування можливості проведення процедури ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна при нерухомому роторі. Використано методи опису електромагнітних процесів, відомі з теорії електричних машин. Отримано вирази, які дозволяють визначати параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, що використовують як вихідну інформацію дані дослідів несиметричного живлення на постійному й змінному струмі. Наведено як повну, так і спрощену системи рівнянь для проведення ідентифікації параметрів. Показано, що при низьких частотах визначення параметрів на основі спрощеної системи рівнянь є неприпустимим. Наведені в роботі вирази можуть служити основою для розробки алгоритмів і програм мікропроцесорних систем приводів змінного струму з асинхронним двигуном при ідентифікації параметрів схеми заміщення.

**Ключові слова:** ідентифікація, асинхронний двигун, схема заміщення.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Для обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов привода с асинхронным двигателем необходимо знать параметры схемы замещения. Процедура идентификации производится при запуске привода в эксплуатацию. В случае питания от преобразователя частоты это может производиться в автоматическом режиме, когда электрическая машина подвергается тестовым воздействиям, на основании которых определяются параметры. Традиционные методы (короткого замыкания, холостого хода) являются не всегда удобными для использования по ряду причин, среди которых можно отметить отсутствие нагрузочной машины, недостаток времени. Также наличие механизма может сделать невозможным получение режима холостого хода. В таких ситуациях удобно использовать несимметричное питание статора асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым (КЗ) ротором. Так, подавая напряжение на две фазы статора вместо трех,

ротор будет оставаться неподвижным, а электромагнитный момент равным нулю.

Что касается определения параметров при неподвижном роторе, в литературе можно условно выделить три подхода к определению параметров: использование переменного напряжения при питании статора [1–3], использование постоянного напряжения [4] и использование частотных характеристик [5]. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, касающиеся точности результатов, используемых алгоритмов и требований к оборудованию. Окончательно задача идентификации параметров схемы замещения АД еще не решена. Актуальным является разработка метода, отличающегося доступностью в реализации, требующего сравнительно невысокие вычислительные ресурсы при необходимой точности получаемых результатов.

Целью данной работы является обоснование возможности проведения процедуры идентифика-

ции параметров схемы замещения АД с КЗ при неподвижном роторе.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

Рассмотрим случай подачи на статор постоянного напряжения. Пусть фазы А и В получают питание от источника постоянного напряжения величиной  $U$ . Можно считать, что в фазу А включен источник с напряжением  $\frac{U}{2}$ , а в фазу В – источник с напряжением  $-\frac{U}{2}$ . При этом будет выполняться условие  $u_a + u_b + u_c = 0$ . Обобщенный вектор напряжения будет неподвижным на комплексной плоскости и равным

$$\underline{U} = \frac{2}{3} \left( \frac{U}{2} + \left( -\frac{U}{2} \right) e^{j120^\circ} \right) = \frac{U}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ}.$$

Уравнения статорной и роторной цепи в обобщенных векторах в неподвижной системе координат:

$$\begin{cases} \underline{U}_S = \underline{I}_S R_1 + L_1 \frac{d\underline{I}_S}{dt} + L_{12} \frac{d\underline{I}_R}{dt}; \\ 0 = \underline{I}_R R_2 + L_{12} \frac{d\underline{I}_S}{dt} + L_2 \frac{d\underline{I}_R}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_1, R_2$  – активные сопротивления статора и ротора;  $L_1, L_2, L_{12}$  – индуктивности статора, ротора и ветви намагничивания.

Спроецировав уравнения системы (1) на действительную ось  $\alpha$  комплексной плоскости, совпадающую с осью фазы А статора (индекс  $\alpha$  в обозначениях токов и напряжений опустим), получим

$$\begin{cases} u_S = i_S R_1 + L_1 \frac{di_S}{dt} + L_{12} \frac{di_R}{dt}; \\ 0 = i_R R_2 + L_{12} \frac{di_S}{dt} + L_2 \frac{di_R}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $u_s$  и  $i_s$  соответствуют напряжению и току статора фазы А. Из системы (2) можно получить следующее уравнение, связывающее  $u_s$  и  $i_s$  с параметрами машины (индекс  $\alpha$  в обозначениях токов и напряжений опустим):

$$\left( \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{R_2} \right) \frac{d^2 i_S}{dt^2} + \left( \frac{L_1 R_2 + R_1 L_2}{R_2} \right) \frac{di_S}{dt} + R_1 i_S = u_S + \frac{du_S}{dt} \frac{L_2}{R_2}. \quad (3)$$

Здесь  $u_s$  и  $i_s$  соответствуют напряжению и току статора фазы А. Решая (2) с учетом нулевых начальных условий и  $u_s = const$ , получим

$$i_S = \frac{u_S}{2R_1} + C_1 e^{-t/T_1} + C_2 e^{-t/T_2}, \quad (4)$$

$$\text{где } T_1 = \frac{2L_{12}(L_1\sigma + L_2\sigma)}{L_1\sigma R_2 + L_2\sigma R_1}; \quad T_2 = \frac{L_1\sigma + L_2\sigma}{R_1 + R_2};$$

$$C_1 = \frac{u_S}{2R_1} \frac{T_1}{(T_2 - T_1)}; \quad C_2 = -\frac{u_S}{2R_1} \frac{T_2}{(T_2 - T_1)};$$

$L_1\sigma, L_2\sigma$  – индуктивности рассеяния статора и ротора;  $\frac{u_S}{2R_1}$  – величина тока  $i_s$  в конце переходного процесса.

При снятии экспериментальных данных в кривой тока будут присутствовать помехи. Для уменьшения степени их влияния при проведении процедуры идентификации удобно находить площадь фигуры, заключенной между величиной тока, равной  $\frac{u_S}{2R_1}$ , и кривой изменения тока во времени  $i_s$ . Эта площадь будет равна

$$S = \int_0^\infty \left( \frac{u_S}{2R_1} - i_s \right) dt = \frac{u_S}{2R_1} (T_1 + T_2). \quad (5)$$

Рассмотрим несимметричное питание фаз А и В статора переменным напряжением  $u = Um \sin(\omega t)$ .

Будем рассматривать установившийся режим. Считаем, что в фазу А включен источник с напряжением  $\frac{Um}{2} \sin(\omega t)$ , а в фазу В – с напряжением  $-\frac{Um}{2} \sin(\omega t)$ . Им соответствуют комплексные ве-

$$\text{личины } \underline{U}_A = -\underline{U}_B = \frac{Um}{2} e^{j0^\circ}; \quad \underline{U}_C = 0.$$

Комплексные величины токов фаз статора:  $\underline{I}_A = -\underline{I}_B = \underline{I}_1; \quad \underline{I}_C = 0$ .

Используя метод симметричных составляющих [6], можно найти составляющие напряжения и тока статора прямой последовательности:

$$\underline{U}_{11} = \frac{Um}{6} (1 - e^{j120^\circ}); \quad (6)$$

$$\underline{I}_{11} = \frac{I_1}{3} (1 - e^{j120^\circ}). \quad (7)$$

Найдя отношение напряжения и тока статора прямой последовательности, можно получить активную и реактивную составляющую входного сопротивления схемы замещения со стороны статора:

$$\underline{Z} = R_{vx} + jX_{vx},$$

где

$$R_{vx} = R_1 + \frac{(\omega L_m)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_2 \sigma)^2};$$

$$X_{vx} = \omega L_1 \sigma + \frac{\omega L m \omega L_2 \sigma (\omega L m + \omega L_2 \sigma) + \omega L m R_2^2}{R_2^2 + (\omega L m + \omega L_2 \sigma)^2},$$

которые совместно с выражением (5), с учетом допущения о равенстве индуктивных сопротивлений рассеяния статора и ротора ( $L_1 \sigma = L_2 \sigma = L \sigma$ ), образуют систему уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{4L_{12}}{R_1 + R_2} + \frac{2L\sigma}{R_1 + R_2} &= K1; \\ R_1 + \frac{(\omega L_{12})^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_{12} + \omega L\sigma)^2} &= K2; \\ \omega L\sigma + \frac{\omega L_{12} \omega L\sigma (\omega L_{12} + \omega L\sigma) + \omega L_{12} R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_{12} + \omega L\sigma)^2} &= K3. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Для решения данной системы нелинейных уравнений можно применить метод простых итераций (называемый также методом последовательных приближений) и метод Ньютона, который имеет несколько модификаций. Если нулевое приближение выбрано удачно, метод Ньютона сходится достаточно быстро (обычно за 3–5 итераций), поэтому на практике этот метод используется чаще всего. Решая систему (8), находят параметры схемы замещения. Величины  $K1$ – $K3$  определяются экспериментально. Сопротивление статора измеряется на постоянном токе и считается известным.

В работе [8] было показано, что с ростом частоты питания статора входное активное и реактивное сопротивления АД со стороны статора при неподвижном роторе практически становятся равным активному сопротивлению  $R_1 + \frac{Lm^2 R_2}{(Lm + L_2 \sigma)^2}$  и реактивному сопротивлению с индуктивностью, равной  $L_1 \sigma + \frac{Lm L_2 \sigma}{Lm + L_2 \sigma}$ . Это служит основанием для упрощения второго и третьего уравнений системы (8), которая запишется в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{4L_{12}}{R_1 + R_2} + \frac{2L\sigma}{R_1 + R_2} &= K1; \\ R_1 + \frac{(\omega L_{12})^2 R_2}{(\omega L_{12} + \omega L\sigma)^2} &= K2; \\ \omega L\sigma + \frac{\omega L_{12} \omega L\sigma}{(\omega L_{12} + \omega L\sigma)} &= K3. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Однако, как показано в [9], из-за наличия эффекта вытеснения тока в роторе опыт двухфазного питания на переменном токе должен проводиться на пониженной частоте. За такую частоту принимается 5 Гц. Это значение является пределом низких частот, при котором явление вытеснения тока в проводниках обмотки ротора еще настолько незначительно, что им можно пренебречь.

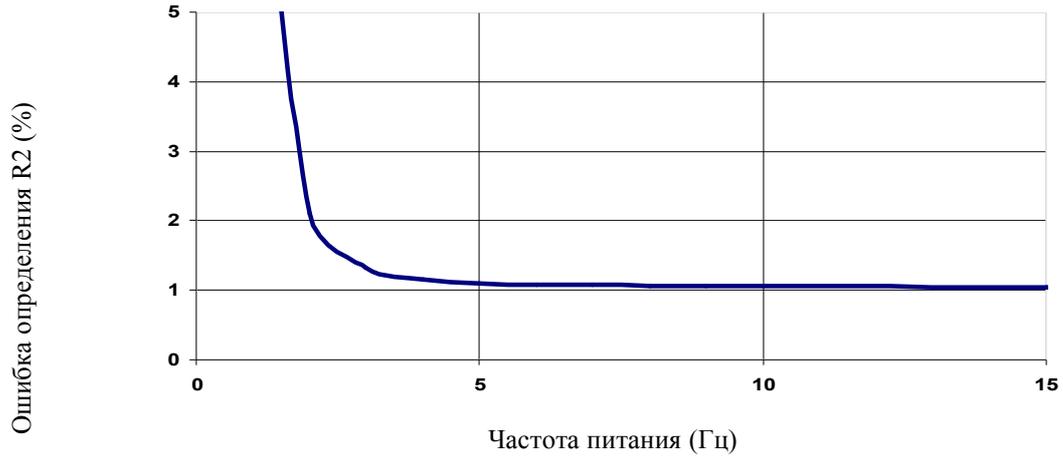
Поскольку система уравнений (9) использует приближенные выражения (второе и третье уравнения системы), это вносит погрешность при нахождении параметров. Были проведены исследования влияния частоты питания статора на точность определения параметров схемы замещения. Расчеты выполнялись в относительных единицах для параметров  $R_2$ ,  $X_m$ ,  $X_1 + X_2$  ( $X_m$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  – сопротивления взаимной индукции, рассеяния статора и ротора в относительных единицах) для двух наборов параметров, соответствующих двигателям мощностью 1 и 100 кВт. Значения параметров схемы замещения были взяты из [7] и приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры схемы замещения (в относительных единицах)

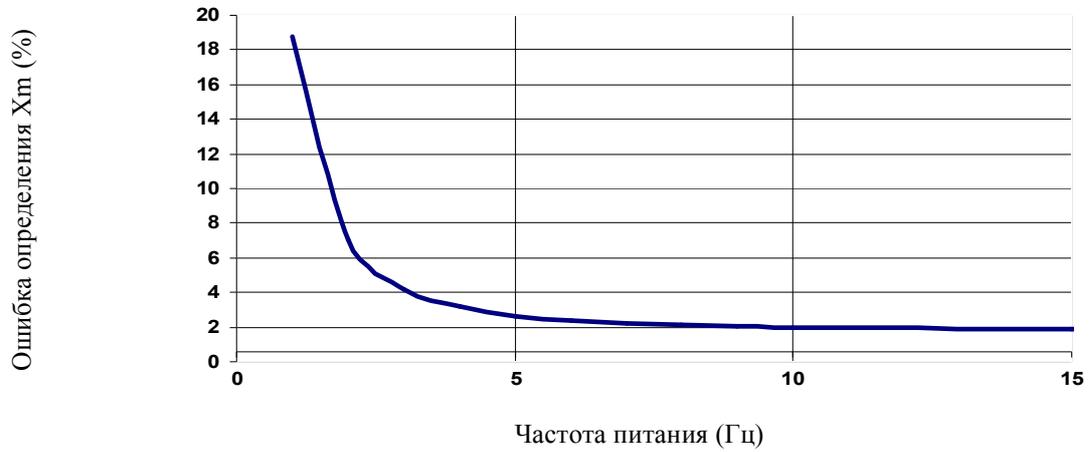
Параметр	Мощность	
	1 kW	100 kW
$X_m$	2,5	4
$R_m$	0,5	0,6
$R_1$	0,05	0,02
$R_2$	0,06	0,03
$X_1$	0,09	0,07
$X_2$	0,12	0,085

Результаты для двигателя мощностью 1 кВт приведены в виде графиков на рис. 1 (для двигателя мощностью 100 кВт значения ошибки оказались меньшими и в виде графиков не приводятся). Наиболее критичной оказалась величина  $X_1 + X_2$  (рис. 1,в). Расчеты показывают, что ошибка в определении  $X_1 + X_2$  при частоте 5 Гц составляет около 41 %, а при частоте 3 Гц – уже 110 %. Это говорит о невозможности использования системы уравнений (9) на основе упрощенных выражений для идентификации параметров.

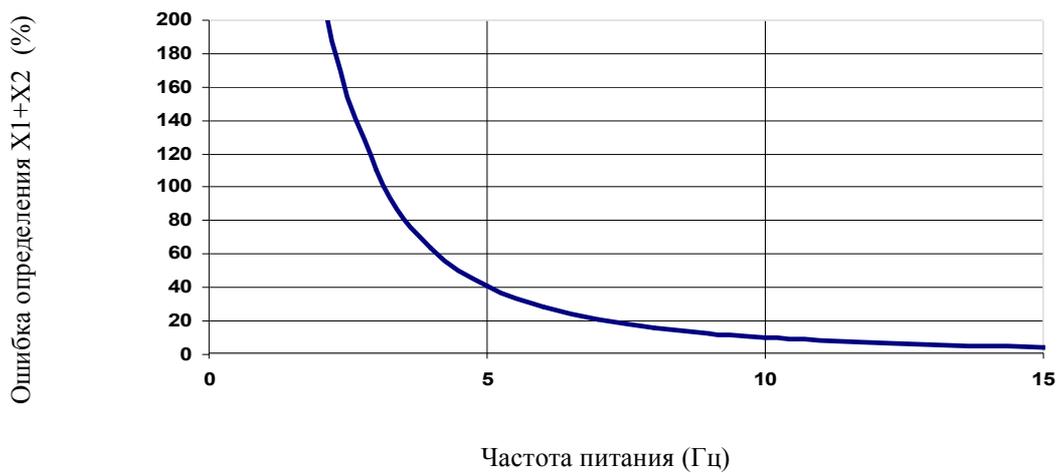
Также были проведены исследования влияния частоты питания статора на точность определения параметров схемы замещения для двигателя мощностью 1 кВт для системы (8). Результаты приведены в виде графиков на рис. 2.



а)

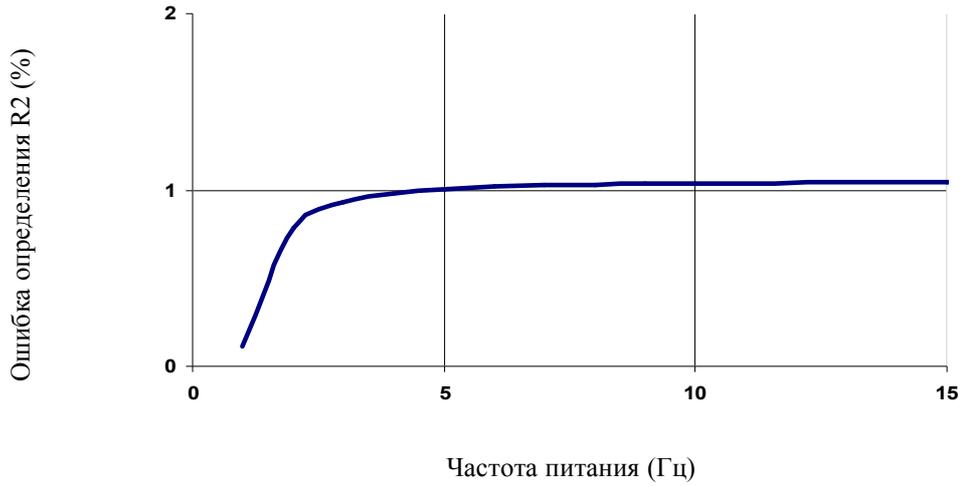


б)

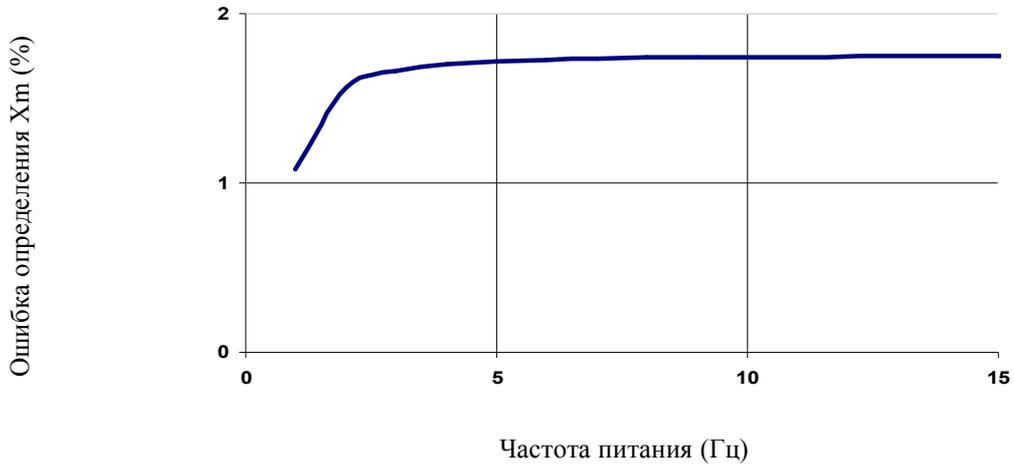


в)

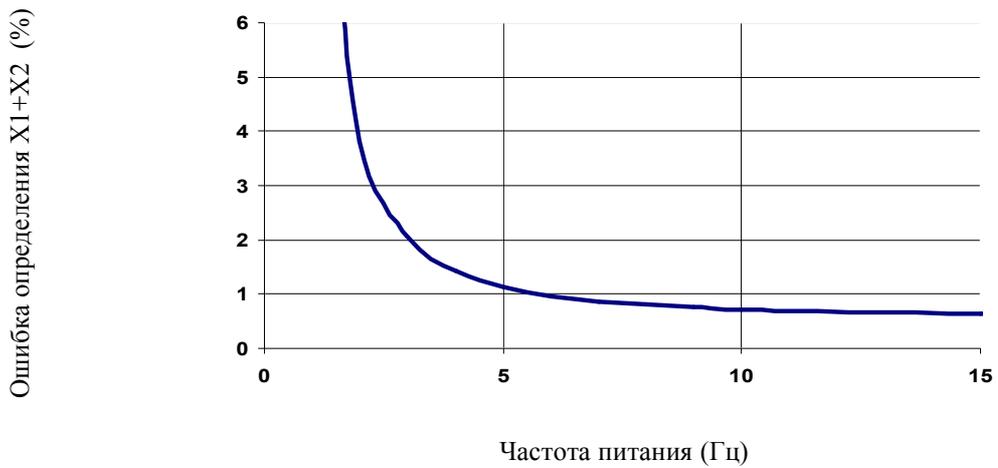
Рисунок 1 – Ошибка определения величин при использовании системы уравнений (9):  
а)  $R_2$ ; б)  $X_m$ ; в)  $X_1+X_2$



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Ошибка определения величин при использовании системы уравнений (8):  
а)  $R_2$ ; б)  $X_m$ ; в)  $X_1+X_2$

Ошибка в определении  $X_1+X_2$  (рис. 2,в) при частоте 5 Гц составляет около 1,125 %, а при частоте 3 Гц – 2,055 %. Для других параметров значение ошибки не превышает 2 % для всего диапазона частот. Это является приемлемым, и система (8) может быть использована для идентификации параметров данным способом.

**ВЫВОДЫ.** Использование несимметричного питания статора позволяет идентифицировать параметры схемы замещения АД с КЗ при неподвижном роторе. Метод не требует реализации режима холостого хода, что важно при наличии механического соединения двигателя с механизмом.

Используются напряжения постоянного и переменного тока. Параметры схемы замещения находятся как результат решения системы нелинейных уравнений с помощью численного метода.

Приведены как полная (8), так и упрощенная (9) системы уравнений для проведения идентификации параметров. Показано, что при низких частотах определение параметров на основе упрощенной системы уравнений является недопустимым.

Приведенные в работе выражения могут служить основой для разработки алгоритмов и программ микропроцессорных систем приводов переменного тока с АД при идентификации параметров схемы замещения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д.И., Здор И.Е. Современные методы определения параметров асинхронных двигателей после их ремонта // Проблемы создания новых машин и технологий: научные труды Кременчугского государственного политехнического института. – 1998. – № 1. – С. 100–106.
2. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Схемы замещения асинхронных двигателей в задачах

идентификации их электромагнитных параметров // Тематичний випуск наук.-техн. журналу "Електроінформ" "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". – 2009. – С. 392–396.

3. Калинов А.П., Черный А.П. Рациональные подходы при определении параметров машин переменного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – № 2. – С. 115–118.

4. Peixoto Z., Seixas P. Parameters Identification for Induction Machines at Standstill // Proceedings of the 8-th European Conference on Power Electronics and Application, CD-ROM. – 1999.

5. Conte R.N., Pereira L.F.A., Haffner J.F. and others. Parameters Identification of Induction Machines Based on Frequency Response and Optimization Techniques // Proceedings of the 29-th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, CD-ROM. – 2003.

6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.

7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

8. Бешта А.С., Сёмин А.А. Особенности применения Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя для задач идентификации параметров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" науково-виробничого журналу. – 2012. – № 3/2012 (19). – С. 553–555.

9. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

#### PARAMETERS ESTIMATION OF INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUIT USING ASYMMETRICAL STATOR SUPPLY

**A. Beshta, A. Syomin**

State Higher Educational Institution "National Mining University"

prosp. K. Marksa, 19, Dnepropetrovsk, 49027, Ukraine. E-mail: beshtaa@nmu.org.ua, syomin\_andrew@mail.ru

The objective of the paper is to get the substantiation of carrying out the identification procedure of induction motor equivalent circuit parameters when the rotor is stationary. Methods for describing of electromagnetic processes known from the theory of electrical machines are used. Expressions are obtained that allow to determine the parameters of the induction motor equivalent circuit and use as an input the experimental data of AC and DC asymmetric supply of stator. Full and simplified systems of equations for parameter identification are given. It is shown that estimation based on a simplified system of equations at low frequencies is not acceptable. Proposed expressions can serve as a basis for the development of algorithms and software for microprocessor systems of AC drives with induction motors for the identification of equivalent circuit parameters.

**Key words:** induction motor, identification, equivalent circuit.

## REFERENCES

1. Rodkin, D.I. and Zdor, I.E. (1998), "Modern methods of determination of induction motor parameters after repair", *Problemy sozdaniya novykh mashin i tekhnologiy: Nauchnyye trudy Kremenchugskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta*, Vol. 1, pp. 100–106. (in Russian)
2. Rodkin, D.I. and Romashikhin, Yu.V. (2009), "Equivalent circuit of induction motor in problems of identification", *Tematichniy випуск nauk.-tehn. zhurnalu "Elektroinform" "Problemy avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika"*, pp. 392–396. (in Russian)
3. Kalinov, A.P. and Chorny, O.P. (2004), "Rational approaches for determination of the parameters of AC machines", *Visnyk Kremenchutskogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu*, no. 2, pp. 115–118. (in Russian)
4. Peixoto, Z. and Seixas, P. (1999), "Parameters Identification for Induction Machines at Standstill", *Proceedings of the 8-th European Conference on Power Electronics and Application*, CD-ROM.
5. Conte, R.N., Pereira, L.F.A., Haffner, J.F., Scharlau, C.C., Campestrini, L. and Fehlberg, R.P. (2003), "Parameters Identification of Induction Machines Based on Frequency Response and Optimization Techniques", *Proceedings of the 29-th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, CD-ROM.
6. Bessonov, L.A. (1996), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical fundamentals of electrical engineering], Visshaya shkola, Moscow. (in Russian)
7. Ivanov-Smolenskiy, A.V. (1980), *Elektricheskie mashiny* [Electric machines], Energiya, Moscow. (in Russian)
8. Beshta, A.S. and Semin, A.A. (2012), "Special feature of using of T-shaped induction motor equivalent circuit for problems of parameters identification", *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy. Tematichniy випуск "Problemy avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika"*, Vol. 3, no. 19, pp. 553–555. (in Russian)
9. Zherve G.A. (1984), *Promishlennye ispitaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electric machines], Energoatomizdat, Leningrad. (in Russian)

Стаття надійшла 17.04.2014.