ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОХИБОК У ВИХІДНИХ ДАНИХ НА РЕЗУЛЬТАТ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

О. С. Бешта, А. О. Сьомін

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна. E-mail: beshtaa@nmu.one, syomin_a@ukr.net

В роботі наголошується, що на результат ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна може суттєво впливати наявність похибок у вихідних експериментальних даних. Попередньо була проведена оцінка впливу похибок на ідентифікацію кожного параметра схеми заміщення, використовуючи вирази для вхідної активної та реактивної складових вхідного опору з боку статора. На базі отриманих рекомендацій була складена система нелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів. Після лінеаризації даної системи нелінійних рівнянь було розраховано число обумовленості матриці коефіцієнтів при різних значеннях частоти живлення статора. Це дало змогу визначити мінімально допустимі значення частот живлення обмоток статора, при яких зберігається прийнятна чутливість рішення системи рівнянь до наявності похибок у вихідних експериментальних даних. При цьому забезпечується помилка ідентифікації не більш 10 % при наявності помилки знаходження вхідного опору з боку статора не більше 5 %. Був проведений аналіз взаємозв'язку рекомендованої частоти живлення статора й потужності двигуна. Виявилось, що найкраще цей взаємозв'язок описується за допомогою логарифмічного рівняння.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, ідентифікація, схема заміщення.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОШИБОК В ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА РЕЗУЛЬТАТ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

А. С. Бешта, А. А. Сёмин

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49005, Украина. E-mail: beshtaa@nmu.one, syomin_a@ukr.net

В работе отмечается, что на результат идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя может существенно влиять наличие ошибок в исходных экспериментальных данных. Предварительно была проведена оценка влияния погрешностей на идентификацию каждого параметра схемы замещения, используя выражения для входной активной и реактивной составляющих входного сопротивления со стороны статора. На базе полученных рекомендаций была составлена система нелинейных уравнений для нахождения неизвестных параметров. После линеаризации данной системы нелинейных уравнений было рассчитано число обусловленности матрицы коэффициентов при различных значениях частоты питания статора. Это позволило определить минимально допустимые значения частот питания обмоток статора, при которых сохраняется приемлемая чувствительность решения системы уравнений к наличию погрешностей в исходных экспериментальных данных. При этом обеспечивается ошибка идентификации не больше 10 % при наличии ошибки нахождения входного сопротивления со стороны статора не более 5 %. Был проведен анализ взаимосвязи рекомендованной частоты питания статора и мощности двигателя. Оказалось, что лучше всего эта взаимосвязь описывается с помощью логарифмического уравнения.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, идентификация, схема замещения.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Основними споживачами електроенергії є асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором. Цьому сприяє низька вартість і висока надійність АД, в порівнянні з іншими типами електричних машин. Ефективному використанню асинхронних двигунів у складі електропривода сприяє знання параметрів схеми заміщення [1]. Параметри схеми заміщення використовуються для налаштування регуляторів системи керування, спостерегаючих пристроїв, при діагностуванні стану електричних машин електротехнічних комплексів, визначенні параметрів машини після ремонту.

Такі параметри, як активний опір ротора, індуктивність ротора, індуктивність ланцюга намагнічування не доступні для безпосереднього виміру. При прийнятно-здавальних випробуваннях вони не

визначаються, а значення, що приводяться в каталогах і довідниках, є розрахунковими й можуть суттєво відрізнятися від реальних значень конкретної машини.

Відомо, що невідповідність налаштувань системи керування фактичним значенням параметрів електропривода може призводити до істотного зниження якості перехідних процесів. Так для асинхронного електропривода з векторним керуванням діапазоном припустимих налаштувань величини $1/T_r$ (T_r – постійна часу роторного кола) у системі керування складає $-40\% \dots +20\%$ від її фактичного значення [2].

На одержання недостовірних результатів під час ідентифікації параметрів суттєво впливає наявність похибок у вихідних експериментальних даних. Це призводить до необхідності уточнення отриманих

значень після проведення ідентифікації та врахування якості вимірюваних експериментальних сигналів і наявності перешкод. Це питання практично не висвітлюється у наукових роботах з даного напрямку [3].

Тому побудова малочутливих до наявності похибок у вихідних експериментальних даних алгоритмів ідентифікації параметрів схеми заміщення є актуальною.

Метою даної роботи є визначення, які саме вирази потрібно використовувати для знаходження невідомих параметрів схеми заміщення АД при нерухомому роторі та при якій умові результат ідентифікації є малочутливим до наявності похибок у вихідних експериментальних даних.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Основними експериментальними даними, одержуваними при дослідженнях, є дані струмів і напруг статора [4, 5]. Прямий взаємозв'язок між цими величинами в усталеному режимі виражається за допомогою активної й реактивної складових вхідного опору. Їхні величини й співвідношення визначають повний вхідний опір і зсув по фазі між напругою й струмом статора. Тому активна й реактивна складові вхідного опору були прийняті в якості аналізованих виразів.

Згідно зі схемою заміщення (рис. 1), вхідний опір з боку статора дорівнює [6]:

$$\dot{Z} = R_1 + j\omega L_{1\sigma} + \frac{j\omega L_m (j\omega L_{2\sigma} + R_2)}{R_2 + j(\omega L_m + \omega L_{2\sigma})}.$$

Після перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{Z} = R_1 + j\omega L_{1\sigma} + \frac{(\omega L_m)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_{2\sigma})^2} + \\ + j \frac{\omega L_m \omega L_{2\sigma} (\omega L_m + \omega L_{2\sigma}) + \omega L_m R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_{2\sigma})^2}, \end{aligned}$$

або

$$\dot{Z} = R_{BX} + jX_{BX},$$

де

$$R_{BX} = R_1 + \frac{(\omega L_m)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_{2\sigma})^2}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} X_{BX} = \omega L_{1\sigma} + \\ + \frac{\omega L_m \omega L_{2\sigma} (\omega L_m + \omega L_{2\sigma}) + \omega L_m R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_{2\sigma})^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Була проведена попередня оцінка впливу похибок у вихідних експериментальних даних на ідентифікацію кожного параметра схеми заміщення безпосередньо з виразів для вхідної активної та реактивної складових вхідного опору з боку статора [7]. Математичні експерименти були виконані в програмі MathCad. Індуктивності розсіювання статора й ротора прийняті рівними ($L_{1\sigma} = L_{2\sigma} = L_{\sigma}$).

Рисунок 1 – Схема заміщення асинхронного двигуна при нерухомому роторі (R_1, R_2 – активні опори статора і ротора; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_m$ – індуктивності розсіювання статора й ротора та взаємна індуктивність).

Параметри ротора приведені до кола статора

Рекомендовані значення частот живлення статора для визначення кожного з параметрів схеми заміщення наведені в табл. 1.

Отримані результати свідчать про істотний вплив наявності похибок у вихідних експериментальних даних на точність результатів ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Ігнорування даного факту приводить до ризику одержання недостовірних результатів.

Серія математичних експериментів, що була проведена для кожного окремо параметра схеми заміщення, дала змогу сформулювати рекомендації з визначення параметрів схеми заміщення при нерухомому роторі [7]:

1) при визначенні R_2 доцільно використовувати вираз для R_{BX} ;

2) при визначенні L_{σ} доцільно використовувати вираз для X_{BX} ;

Таблиця 1 – Рекомендовані значення частот при визначенні параметрів схеми заміщення, залежно від вихідного рівняння при нерухомому роторі

Параметр схеми заміщення	Використовуване рівняння	Частота живлення, Гц				
		Потужність двигуна				
		0,01 кВт	0,1 кВт	1 кВт	10 кВт	100 кВт
R_2	R_{BX}	≥ 15	≥ 12	≥ 10	≥ 8	≥ 5
	X_{BX}	f_0	f_0	f_0	f_0	f_0
L_{σ}	R_{BX}	–	–	–	–	–
	X_{BX}	≥ 15	≥ 12	≥ 10	≥ 8	≥ 5
L_m	R_{BX}	–	–	–	–	–
	X_{BX}	$f_0/2$	$f_0/2$	$f_0/2$	$f_0/2$	$f_0/2$

3) значення частоти напруги живлення статора для ідентифікації активного опору ротора R_2 і усередненого значення індуктивності розсіювання L_σ у складі інших параметрів схеми заміщення АД при нерухомому роторі залежить від величини потужності двигуна. Чим менше потужність двигуна, тим вище повинна бути частота живлення (слід зазначити, що ефект витиснення струму в колі ротора машин малої потужності проявляється меншою мірою, ніж у машинах великої потужності [6];

4) при визначенні L_m доцільно використовувати експериментальні дані дослідів подачі постійної напруги на фази статора (мається на увазі несиметричне живлення фаз статора постійним струмом).

Однак, найбільш просто L_m визначається із загальновідомого методу холостого ходу.

Таким чином, при нерухомому роторі раціонально здається наступна послідовність дій:

1) визначення активного опору статора R_1 на постійному струмі;

2) визначення двох складових вхідного опору зі сторони статора R_{BX} та X_{BX} при одній певній частоті живлення статора;

3) проведення дослідів подачі постійної напруги на фази статора (несиметричне живлення фаз статора постійним струмом) або дослід холостого ходу.

На базі цих експериментальних даних складається система нелінійних рівнянь для знаходження невідомих R_2 , L_σ та L_m .

Система нелінійних рівнянь з урахуванням (1), (2) буде мати вигляд:

$$\begin{cases} R_{BX} = R_1 + \frac{(\omega L_m)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2}; \\ X_{BX} = \omega L_\sigma + \frac{\omega L_m \omega L_\sigma (\omega L_m + \omega L_\sigma) + \omega L_m R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2}; \\ C_1 = \frac{4L_m}{R_1 + R_2} + \frac{2L_\sigma}{R_1 + R_2}. \end{cases} \quad (3)$$

Третє рівняння системи (3) пов'язане з дослідом подачі постійної напруги на дві фази статора, що детально описується в [8].

При використанні дослідів холостого ходу система рівнянь буде мати наступний вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial R_2} & \frac{\partial f_1(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_\sigma} & \frac{\partial f_1(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_m} \\ \frac{\partial f_2(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial R_2} & \frac{\partial f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)})}{\partial L_\sigma} & \frac{\partial f_2(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_m} \\ \frac{\partial f_3(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial R_2} & \frac{\partial f_3(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_\sigma} & \frac{\partial f_3(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_m} \end{pmatrix},$$

де частинні похідні, наприклад, для системи (3) дорівнюють:

$$\frac{\partial f_1}{\partial R_2} = \frac{(\omega L_m)^2 [R_2^2 - (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2]}{[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2]^2};$$

$$\begin{cases} R_{BX} = R_1 + \frac{(\omega L_m)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2}; \\ X_{BX} = \omega L_\sigma + \frac{\omega L_m \omega L_\sigma (\omega L_m + \omega L_\sigma) + \omega L_m R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2}; \\ C_2 = L_m + L_\sigma. \end{cases} \quad (4)$$

Оцінимо вплив похибок у вихідних даних на результат рішення даних систем нелінійних рівнянь (3)–(4). Рішення системи нелінійних рівнянь знаходиться за допомогою чисельних методів за певну кількість ітерацій [9]. На ітерації нелінійного алгоритму використовується рішення лінійної системи рівнянь, яка отримується шляхом лінеаризації. Якщо рішення лінійної системи дуже чутливо до зміни даних у цій системі, її називають погано обумовленою і нам потрібен спосіб розпізнавання таких систем [10].

Відносна зміна x системи $Ax = b$ обмежена відносною зміною даних, помноженим на $\|A\| \cdot \|A^{-1}\|$ ($\|A\|$ – норма матриці A). Ця величина відома як *число обумовленості* матриці A . Воно позначається в разі використання індукованої матричної l_p -норми через $\chi_p(A)$. Число обумовленості невиродженої матриці служить ступенем близькості матриці до виродженості. Для виконання оцінки чутливості рішення системи нелінійних рівнянь приведемо її до лінійного вигляду.

Нехай існують нелінійні рівняння виду

$$f_k(a, b, c, \dots) = l_k,$$

де k – номер рівняння;

f_k – функції аргументів $a, b, c, \dots$;

l_k – випадкові помилки, величинами яких не можна нехтувати.

Для приведення до лінійного вигляду використаємо метод, що описаний в [11]. В нашому випадку $a = R_2$, $b = L_\sigma$, $c = L_m$. Після лінеаризації матриця A буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_1}{\partial L_\sigma} &= \frac{2\omega R_2 (\omega L_m)^2 (\omega L_m + \omega L_\sigma)}{\left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]^2}; \\ \frac{\partial f_1}{\partial L_m} &= \frac{2L_m \omega^2 R_2 \left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]}{\left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]^2} - \frac{2\omega (\omega L_m)^2 R_2 (\omega L_m + \omega L_\sigma)}{\left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]^2}; \\ \frac{\partial f_2}{\partial R_2} &= \frac{-2R_2 \omega L_m}{\left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]} + \frac{2R_2 \left[\omega^2 L_m L_\sigma (\omega L_m + \omega L_\sigma) + \omega L_m R_2^2\right]}{\left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]^2}; \\ \frac{\partial f_2}{\partial L_\sigma} &= -\omega - \frac{(\omega^3 L_m^2 + 2\omega^3 L_m L_\sigma)}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2} + \frac{2\omega \left[\omega^2 L_m L_\sigma (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2 + \omega L_m R_2^2 (\omega L_m + \omega L_\sigma)\right]}{\left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]^2}; \\ \frac{\partial f_2}{\partial L_m} &= -\frac{(\omega^3 L_\sigma^2 + 2\omega^3 L_m L_\sigma)}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2} + \frac{2\omega \left[\omega^2 L_m L_\sigma (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2 + \omega L_m R_2^2 (\omega L_m + \omega L_\sigma)\right]}{\left[R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_\sigma)^2\right]^2}; \\ \frac{\partial f_3}{\partial R_2} &= \frac{4L_m + 2L_\sigma}{(R_1 + R_2)^2}; \quad \frac{\partial f_3}{\partial L_\sigma} = \frac{-2}{R_1 + R_2}; \quad \frac{\partial f_3}{\partial L_m} = \frac{-4}{R_1 + R_2}.\end{aligned}$$

Результати чисельного моделювання показали, що в залежності від частоти живлення число обумовленості $\chi_p(A)$ змінюється неоднаково при різних значеннях потужності двигуна. Так, на рис. 2 наведена крива зміни $\chi_p(A)$ для двигуна потужністю 1 кВт та числом пар полюсів 2...4.

Рисунок 2 – Зміна $\chi_p(A)$ в залежності від частоти живлення для двигуна потужності 1 кВт

З графіку видно, що в області низьких частот різко збільшується чутливість рішення системи рівнянь до зміни даних у цій системі. Причому, як показали розрахунки, зростання має місце при різних значеннях частоти для машин різної потужності.

При розгляді цього питання було прийнято, що допустимим є відхилення результату рішення не більше 10 % при наявності помилки в межах $\pm 5\%$ у вихідних експериментальних даних. На основі цього допущення були визначені мінімально допустимі значення частот живлення обмоток статора, при яких зберігається прийнятна чутливість рішення

системи рівнянь. Необхідно зазначити, що значення частот співпали зі значеннями, що отримані в табл. 1 при аналізі кожного окремого виразу для складових вхідного опору зі сторони статора. Також слід зауважити, що при збільшенні частоти живлення починає проявлятися ефект витіснення струму ротора. Тому отримані значення мінімально допустимих частот живлення і є рекомендованими для застосування.

Результати при різних значеннях потужності та числі пар полюсів машини наведені в табл. 2. Параметри схеми заміщення були взяті в [12].

Таблиця 2 – Рекомендована частота живлення асинхронного двигуна

№	Потужність, кВт	Число пар полюсов	
		1	2...4
1	0,01	17	15
2	0,1	13	12
3	1	11	10
4	10	9	8
5	100	6	5

Проведемо кореляційно-регресійний аналіз взаємозв'язку рекомендованої частоти (y) і величини потужності двигуна (x). З табл. 2 видно, що зв'язок між величинами носить нелінійний характер. Були досліджені три види функцій, що характеризують залежність величин: рівняння логарифмічного типу, рівняння параболи другого порядку, гіперболічне рівняння.

Для знаходження невідомих коефіцієнтів рівнянь регресії використовувались відповідні системи нормальних рівнянь [13]. Так для машин з числами пар полюсів $p = 2...4$ було отримано:

$$\begin{aligned} y_x &= 10 - 2,4 \log x; \\ y'_x &= 12,6 - 0,529x + 0,00453x^2; \\ y''_x &= 8,48 + 0,68 \frac{1}{x}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для машин з числом пар полюсів $p = 1$ за даними табл. 2 також отримано:

$$\begin{aligned} y_x &= 11,2 - 2,6 \log x; \\ y'_x &= 13,967 - 0,573x + 0,00493x^2; \\ y''_x &= 9,46 + 0,078 \frac{1}{x}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для вимірювання тісноти зв'язку між факторним і результативним показником при нелінійній залежності обчислюється кореляційне відношення:

$$\eta = \sqrt{\frac{\delta_y^2 - \delta_{y_x}^2}{\delta_y^2}},$$

де $\delta_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}; \quad \delta_{y_x}^2 = \frac{\sum (y_i - y_{x_i})^2}{n};$
 n – кількість спостережень.

Чим ближче величина кореляційного відношення до одиниці, тим тісніший зв'язок існує між явищами, що вивчаються. Також, для оцінки якості зв'язку при нелінійній залежності, визначають індекс детермінації, що дорівнює квадрату кореляційного відношення:

$$R^2 = \eta^2.$$

Для оцінки якості побудованої моделі розраховують середню помилку апроксимації (A), яка показує, на скільки відсотків в середньому відрізняються фактичні значення результативного показника (y) від значень, розрахованих по побудованій моделі:

$$\bar{A} = \frac{\sum |y_i - y_x|}{n} \cdot 100\%,$$

де $|y_i - y_x|$ – відхилення вирівняних значень у від фактичних, взяте по модулю.

Розрахунки показали, що за всіма трьома показниками логарифмічне рівняння краще представляє вихідні дані. Отримане значення середньої помилки апроксимації не перевищує 10 %, отже, можна говорити про хорошу якість побудованої моделі.

Результати розрахунків для логарифмічного рівняння регресії наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Розраховані показники логарифмічного рівняння регресії

№	Показник	$p = 2 \dots 4$	$p = 1$
1	η	0,996	0,991
2	R^2	0,993	0,983
3	$\bar{A}, \%$	2,733	3,189

ВИСНОВКИ. На базі отриманих рекомендацій, стосовно впливу похибок у вихідних експериментальних даних на ідентифікацію кожного параметра

схеми заміщення безпосередньо з виразів для вхідної активної та реактивної складових вхідного опору з боку статора, була складена система нелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів. Оцінено вплив похибок у вихідних даних на результат рішення даної системи нелінійних рівнянь за допомогою процедури лінеаризації та подальшого використання числа обумовленості матриці. Визначені мінімально допустимі значення частот живлення обмоток статора, при яких зберігається прийнятна чутливість рішення системи рівнянь до наявності похибок у вихідних експериментальних даних. Слід зауважити, що при збільшенні частоти живлення починає проявлятися ефект витіснення струму ротора, тому отримані значення частоти живлення і є рекомендованими. При цьому забезпечується помилка ідентифікації не більш 10 % при наявності помилки знаходження вхідного опору з боку статора не більше 5 %.

Був проведений кореляційно-регресійний аналіз взаємозв'язку рекомендованої частоти живлення статора й потужності двигуна. Виявилось, що найкраще вихідні дані описуються за допомогою логарифмічного рівняння.

Так, ідентифікацію параметрів схеми заміщення асинхронних машин з числом пар полюсів $p = 1$ необхідно виконувати, використовуючи залежність (5). При числі пар полюсів $p = 2 \dots 4$ – залежність (4).

ЛІТЕРАТУРА

1. Michalik W. Parameter estimation methods at three-phase induction machines. *Proceedings of the 11-th International Conference on Power Electronics and Application – EPE 2005*. Dresden, Germany, 2005.
2. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электро-механические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Изд-во Чувашского Университета, 1998. 173 с.
3. Xing Zhan, Guohui Zeng, Jin Liu, Qingzhen Wang, Sheng Ou. A Review on Parameters Identification Methods for Asynchronous Motor. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2015. Vol. 6. No. 1. PP. 104–109.
4. Peixoto Z., Seixas P. Parameters Identification for Induction Machines at Standstill. *Proceedings of the 8-th European Conference on Power Electronics and Application – EPE-1999*. Lausanne, 1999.
5. Gaiceanu M., Buhosu R. Parameters Identification of the Three-phase Squirrel-cage Induction Motor. *Acta Materialia Turcica*. 2017. Vol. 1. PP. 40–44.
6. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. Т.1. Москва : МЭИ, 2004. 652 с.
7. Бешта А. С., Сёмин А. А. Оценка точности идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2017. № 1 (37). С. 15–20.
8. Бешта А. С., Сёмин А. А. Определение параметров схемы замещения АД при несимметричном питании статора. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. № 2 (26). С. 10–16.
9. Бахвалов Н. С., Жидков Н. Л. и др. Числен-

ные методы. Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2003. 632 с.

10. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. Введение в Октаве для инженеров и математиков. Москва : ALT Linux, 2012. 368 с.

11. Фомалев В. Ф., Ревизников Д. Л. Численные

методы. Москва : Физматлит, 2004. 400 с.

12. Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам. Москва : Издательский центр «Академия», 2005. 480 с.

13. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Москва : «Диалектика», 2007. 912 с.

ESTIMATION OF THE IMPACT OF ERRORS IN THE INITIAL DATA ON THE RESULTS OF IDENTIFICATION OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR

O. Beshta, A. Syomin

National Technical University "Dnipro Polytechnic"

prosp. Dmytra Yavornitskoho, 19, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: beshtaa@nmu.one, syomin_a@ukr.net

Purpose. To determine which expressions should be used to evaluate unknown parameters of induction motor equivalent circuit for stationary rotor, and under which condition the result of the identification would have low sensitivity to the presence of errors in the initial experimental data. **Methodology.** We have applied the calculation of the condition number of the coefficients matrix of the linearized equation system. It enable find out what frequency values of stator voltage make possible to get low sensitivity of the results of parameters identification to errors in the initial data. A correlation-regression analysis of the relationship between the recommended stator power frequency and motor power was carried out. **Results.** A system of nonlinear equations was compiled for finding unknown parameters of equivalent circuit. For a given system of nonlinear equations, using the linearization procedure, the condition number of the coefficient matrix was calculated for different frequencies of power supply. This made it possible to determine the admissible values of the supply frequencies of the stator windings at which the acceptable sensitivity of the equations system solution to the presence of errors is maintained. An analysis was conducted of the relationship between the recommended stator power frequency and electric motor power. It turned out that this relationship is best described using a logarithmic equation. **Originality.** For the first time, we have carried out the research of the impact of stator voltage frequency on the results of parameter identification and obtained the dependency of recommended stator voltage frequency from motor power. **Practical value.** Obtained results allow to adjust the controllers in the control system of induction motor drive in accordance with the actual values of parameters of induction motor. This will ensure the quality of drive regulation. References 13, tables 3, figures 2.

Key words: induction motor, identification, equivalent circuit.

REFERENCES

1. Michalik, W. (2005). Parameter estimation methods at three-phase induction machines. *Proceedings of the 11-th International Conference on Power Electronics and Application – EPE 2005*. Dresden, Germany.

2. Pozdeev, A. D. (1998). *Elektromagnitnie i elektromekhanicheskie protsessy v chastotno-reguliruemih asinhronnih elektroprivodah [Electromagnetic and Electromechanical Processes in Variable Frequency Induction Motor Electric Drives]*. Cheboksari: Publishing House of Chuvash University. [in Russian]

3. Xing, Zhan, Guohui, Zeng, Jin, Liu, Qingzhen, Wang, & Sheng, Ou. (2015). A Review on Parameters Identification Methods for Asynchronous Motor. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 6 (1), 104–109.

4. Peixoto, Z., & Seixas, P. (1999). Parameters Identification for Induction Machines at Standstill. *Proceedings of the 8-th European Conference on Power Electronics and Application, EPE-1999*. Lausanne.

5. Gaiceanu, M., & Buhosu, R. (2017). Parameters Identification of the Three-phase Squirrel-cage Induction Motor. *Acta Materialia Turcica*, 1, 40–44.

6. Ivanov-Smolenskiy, A. V. (2004). *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow: MEI. [in Russian]

7. Beshta, A. S., & Semin, A. A. (2017). Accuracy estimation of the equivalent circuit parameters identification of squirrel cage induction motor. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 1 (37), 15–20. [in Russian]

8. Beshta, A. S., & Semin, A. A. (2014). Parameters estimation of induction motor equivalent circuit using asymmetrical stator supply. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 2 (26), 10–16. [in Russian]

9. Bakhvalov, N., & Zhidkov, N. et al. (2003). *Chislennyye metody [Numerical methods]*. Moscow: Laboratoriya Bazovyykh Znaniy. [in Russian]

10. Alekseev, E., & Chesnokova, O. (2012). *Vvedeniye v Oktave dlya inzhenerov i matematikov [An introduction to Octave for engineers and mathematicians]*. Moscow: ALT Linux. [in Russian]

11. Fomalev, V., & Reviznikov, D. (2004). *Chislennyye metody [Numerical methods]*. Moscow: Fizmatlit. [in Russian]

12. Katsman, M. (2005). *Spravochnik po elektricheskim mashinam [Handbook of electric machines]*. Moscow: Publishing Center "Akademiya". [in Russian]

13. Draper, N., & Smith, G. (2007). *Prikladnoy regressionniy analiz [Applied Regression Analysis]*. Moscow: Dialektika. [in Russian]

Стаття надійшла 02.03.2019.