

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.10

УДК 62-83:681.513.5

Клюєв О.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-4542-3317, e-mail: kluev2006@ukr.net

Садовой О.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9739-3661, e-mail: sadovoyav@ukr.net

Сохіна Ю.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-4329-5182, e-mail: jvsokhina@gmail.com

Ящук О.О., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID: 0009-0007-3841-8997, e-mail: olehyashchuk@gmail.com

Бородай І.В., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kliuiev Oleh, Candidate of technical sciences, Associate professor Electrotechnical and electromechanical department

Sadovoi Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor Electrotechnical and electromechanical department

Sokhina Yuliya, Candidate of technical sciences, Associate professor Electrotechnical and electromechanical department

Yashchuk Oleh, Postgraduate Student

Borodai Illia, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

СПОСТЕРІГАЧ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ З ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ АКТИВНИХ ОПОРІВ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

У статті здійснено синтез алгоритмів ідентифікації активних опорів статора та ротора асинхронної машини (АМ), що входять як параметри в рівняння спостерігача потокозчеплення ротора в складі релейно-векторної системи керування асинхронним електроприводом. Структуру цих алгоритмів, що обумовлена функцією адаптації, знайдено з використанням умов стійкості нелінійних систем, сформульованих у другій теоремі Ляпунова про стійкість руху. Параметри алгоритмів підбиралися в ході дослідження математичної моделі синтезованої системи керування. Визначено умови асимптотичної стійкості кожного алгоритму ідентифікації. Проведено порівняльний аналіз показників якості перехідних процесів оцінювання активних опорів АМ.

Ключові слова: асинхронна машина; функція Ляпунова; параметрична ідентифікація; релейний регулятор; функція адаптації; асимптотична стійкість.

The paper presents a synthesis of algorithms for identifying active resistances of the stator and rotor of an asynchronous machine (AM), which are included as parameters in the equations of the rotor flux linkage observer in the relay-vector control system of an asynchronous electric drive. The structure of these algorithms, determined by the adaptation function, is found using the stability conditions of nonlinear systems formulated in the second Lyapunov theorem of motion stability. The parameters of the algorithms were selected during the study of the mathematical model of the synthesized control system. The conditions of asymptotic stability of each identification algorithm are determined and a comparative analysis of the quality indicators of transient processes of estimating the active resistances of the AM is carried out.

Keywords: asynchronous machine; Lyapunov function; parametric identification; relay controller; adaptation function; asymptotic stability.

Постановка проблеми

Системи керування асинхронних електроприводів використовують значення параметрів схеми заміщення для настроювання регуляторів і спостережних пристроїв. У векторних системах керування асинхронними машинами з короткозамкненим ротором широко використовуються спостерігачі опорного вектора потокозчеплення ротора. Спостерігачі можуть бути розімкнутими, але тоді вони стають чутливими до зміни своїх внутрішніх параметрів і їх точність по визначенню координат опорного вектора потокозчеплення знижується. Найбільшою є чутливість спостерігача потокозчеплення ротора до зміни активного опору фаз ротора [1]. У такому випадку для підвищення точності ідентифікації вектора потокозчеплення синтезують замкнуті спостерігачі, тобто вводять різні зворотні зв'язки. Можна використовувати зворотні зв'язки за сигналами відхилень обчислених значень струмів від їх обмірюваних значень. Співвідношення для вибору знаків і значень коефіцієнтів зворотних зв'язків знаходять, виходячи з другої теореми Ляпунова про стійкість руху. Таким шляхом компенсуються параметричні збурення в асинхронній машині додаванням координатних зворотних зв'язків [2]. Можна використовувати інший підхід. Для цього слід визначати параметри, що є найбільш схильними до зміни, та синтезувати контури параметричного зворотного зв'язку, призначені для ідентифікації цих параметрів протягом роботи електропривода. Часто за цільову функцію приймають суму квадратів відхилень струмів. Для замикавання зворотного зв'язку обчислюють градієнт цільової функції за параметром і подають його на вхід стандартного регулятора. При цьому на виході регулятора буде величина оцінки параметра, що використовується для розрахунку коефіцієнтів підсилення і постійних часу спостерігача потокозчеплення. Для обчислення градієнта за параметром необхідні значення функцій чутливості, які знаходяться в результаті розв'язання диференціальних рівнянь моделі чутливості в реальному часі [3]. Однак рівняння моделі чутливості громіздкі й істотно ускладнюють структуру спостерігача потокозчеплення. Тому виникає задача побудови достатньо простого спостерігача потокозчеплення, адаптивного до зміни активного опору ротора АМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існують методи попередньої ідентифікації параметрів схеми заміщення АМ, яким властива низька чутливість до помилок у вихідних експериментальних даних. У роботі [4] виміри проводять при несиметричному живленні статора. Потім на основі Т-подібної схеми заміщення складається система нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно параметрів АМ, у результаті чисельного розв'язання якої визначаються значення активного опору ротора, індуктивності розсіювання та контуру намагнічування. Методам динамічної ідентифікації параметрів АМ присвячені наступні роботи. У статті [5] синтезований спостерігач потокозчеплення ротора АМ, який працює разом з алгоритмом ідентифікації активних опорів статора та ротора при вимірюваних струмах і напругах статора та кутовій швидкості ротора. На основі другої теореми Ляпунова про стійкість руху, складається система двох диференціальних рівнянь відносно відхилень фактичних опорів від їх номінальних значень, використовуваних у спостерігачі. За допомогою п'яти додаткових параметрів настроювання забезпечується асимптотична стійкість цієї системи рівнянь, тобто відхилення опорів з часом прямують до нуля, а оцінки опорів наближаються до їх реальних значень. У [6] розроблено адаптивний спостерігач потокозчеплення АМ, який містить у своєму складі алгоритм оцінки активного опору ротора, а функція адаптації отримана з використанням другого методу Ляпунова. Однак модель електромагнітних процесів в АМ приймалася нестандартною, оскільки відсутні проекції вектора потокозчеплення ротора. В осях α, β рівняння записані з використанням проекцій векторів струму та потокозчеплення статора, що додає їм більш складну структуру. У [7] для аналітичної ідентифікації активного опору ротора та індуктивності контуру намагнічування розроблено модель з рівнянь стаціонарного стану АМ. Процедура ідентифікації заснована на методі найменших квадратів з використанням інформації про струми та напруги статора і кутової швидкості ротора. Запропоновано алгоритми оцінювання, що знижують вплив умов експлуатації електропривода. У [8] запропоновано векторну систему керування АМ зі спостерігачем швидкості й ідентифікацією активних опорів статора і ротора електричної машини. Схема ідентифікації активного опору статора побудована у вигляді адаптивної системи з еталонною моделлю. Зміна активного опору ротора оцінювалася приблизно як величина, що є пропор-

ційною оцінці активного опору статора. У [9], щоб уникнути використання механічних датчиків у системі векторного керування АМ, оцінка швидкості ротора виконується спостерігачем, що використовує алгоритм MRAS (адаптивна система з еталонною моделлю). Цей спостерігач призначений для одночасної оцінки опору статора і кутової швидкості ротора. Для оцінки потокозчеплення ротора в системі керування використовується спостерігач з ковзним режимом.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає в одержанні одного з варіантів розв'язання задачі підвищення точності адаптивного спостерігача потокозчеплення ротора у складі релейно-векторної системи керування АМ, шляхом реалізації в складі спостерігача алгоритму ідентифікації активного опору ротора, синтезованого на основі другої теореми Ляпунова про стійкість руху.

Виклад основного матеріалу

Якщо в системі рівнянь розімкнутого спостерігача записати спочатку рівняння струмів, а потім рівняння потокозчеплень, то одержимо наступну систему рівнянь [2]:

$$\begin{aligned} p\hat{I}_{s\alpha} &= \frac{K_r R_r}{L_s L_r - L_m^2} \hat{\Psi}_{r\alpha} - \frac{(R_s + K_r^2 R_r) L_r}{L_s L_r - L_m^2} \hat{I}_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \hat{\Psi}_{r\beta} + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} u_{s\alpha}; \\ p\hat{I}_{s\beta} &= \frac{K_r R_r}{L_s L_r - L_m^2} \hat{\Psi}_{r\beta} - \frac{(R_s + K_r^2 R_r) L_r}{L_s L_r - L_m^2} \hat{I}_{s\beta} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \hat{\Psi}_{r\alpha} + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} u_{s\beta}; \\ p\hat{\Psi}_{r\alpha} &= -\frac{R_r}{L_r} \hat{\Psi}_{r\alpha} + R_r K_r \hat{I}_{s\alpha} - \omega \hat{\Psi}_{r\beta}; \quad p\hat{\Psi}_{r\beta} = -\frac{R_r}{L_r} \hat{\Psi}_{r\beta} + R_r K_r \hat{I}_{s\beta} + \omega \hat{\Psi}_{r\alpha}. \end{aligned} \quad (1)$$

У матричній формі система (1) запишеться у такий спосіб

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = A\hat{X} + BU, \quad (2)$$

де $\hat{X} = (\hat{I}_{s\alpha} \quad \hat{I}_{s\beta} \quad \hat{\Psi}_{r\alpha} \quad \hat{\Psi}_{r\beta})^T$; $U = (u_{s\alpha} \quad u_{s\beta})^T$;

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14}\omega \\ 0 & -a_{22} & -a_{23}\omega & a_{24} \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & -\omega \\ 0 & a_{42} & \omega & -a_{44} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У матрицях (3) значення коефіцієнтів наступні:

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{22} &= \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} + \frac{K_r^2 R_r L_r}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a_{13} = a_{24} = \frac{K_r R_r}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a_{31} = a_{42} = K_r R_r; \\ a_{23} = a_{14} &= \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a_{33} = a_{44} = R_r / L_r; \quad b_{11} = b_{22} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Введемо позначення

$$e = X - \hat{X} = (\hat{I}_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha} \quad \hat{I}_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta} \quad \hat{\Psi}_{r\alpha} - \hat{\Psi}_{r\alpha} \quad \hat{\Psi}_{r\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta})^T = (\Delta I_{s\alpha} \quad \Delta I_{s\beta} \quad \Delta \Psi_{r\alpha} \quad \Delta \Psi_{r\beta})^T. \quad (5)$$

Якщо вважати швидкість і всі параметри схеми заміщення крім опорів статора та ротора відомими, то матриця прирощень буде наступною:

$$\begin{aligned} \Delta A = \hat{A} - A &= \begin{pmatrix} -\bar{a}_{11}' \Delta R_s - \bar{a}_{11}'' \Delta R_r & 0 & \bar{a}_{13} \Delta R_r & 0 \\ 0 & -\bar{a}_{11}' \Delta R_s - \bar{a}_{11}'' \Delta R_r & 0 & \bar{a}_{13} \Delta R_r \\ \bar{a}_{31} \Delta R_r & 0 & -\bar{a}_{33} \Delta R_r & 0 \\ 0 & \bar{a}_{31} \Delta R_r & 0 & -\bar{a}_{33} \Delta R_r \end{pmatrix} = \\ &= \Delta R_s \Delta A_s + \Delta R_r \Delta A_r, \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$\Delta A_s = \begin{pmatrix} -\bar{a}_{11}' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\bar{a}_{11}' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \Delta A_r = \begin{pmatrix} -\bar{a}_{11}'' & 0 & \bar{a}_{13} & 0 \\ 0 & -\bar{a}_{11}'' & 0 & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{31} & 0 & -\bar{a}_{33} & 0 \\ 0 & \bar{a}_{31} & 0 & -\bar{a}_{33} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\bar{a}_{11}' = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2}; \bar{a}_{11}'' = \frac{K_r^2 L_r}{L_s L_r - L_m^2}; \bar{a}_{33} = 1/L_r; \bar{a}_{13} = \frac{K_r}{L_s L_r - L_m^2}; \bar{a}_{31} = K_r. \quad (8)$$

Віднімаємо з рівняння електромагнітних процесів двигуна рівняння, що описують оцінку вектора X :

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} - \frac{d\hat{X}}{dt} &= \frac{de}{dt} = AX + BU - \hat{A}\hat{X} - BU = AX - \hat{A}\hat{X} = AX - A\hat{X} - \Delta A\hat{X} = \\ &= A(X - \hat{X}) - \Delta A\hat{X} = Ae - \Delta A\hat{X} = Ae - \Delta R_s \Delta A_s \hat{X} - \Delta R_r \Delta A_r \hat{X}. \end{aligned} \quad (9)$$

Запишемо позитивно визначену функцію, яка претендує на функцію Ляпунова для синтезованого спостерігача

$$V = e^T e + \frac{\Delta R_s^2}{\lambda_s} + \frac{\Delta R_r^2}{\lambda_r} = \Delta I_{s\alpha}^2 + \Delta I_{s\beta}^2 + \Delta \Psi_{r\alpha}^2 + \Delta \Psi_{r\beta}^2 + \frac{\Delta R_s^2}{\lambda_s} + \frac{\Delta R_r^2}{\lambda_r} > 0. \quad (10)$$

З урахуванням (9) знаходимо повну похідну за часом від цієї функції

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \left(\frac{de^T}{dt} \right) e + e^T \left(\frac{de}{dt} \right) + \frac{2\Delta R_s}{\lambda} \frac{d\hat{R}_s}{dt} = e^T A^T e - (\Delta A\hat{X})^T e + e^T Ae - e^T \Delta A\hat{X} + \\ &+ \frac{2\Delta R_s}{\lambda_s} \frac{d\hat{R}_s}{dt} + \frac{2\Delta R_r}{\lambda_r} \frac{d\hat{R}_r}{dt} = e^T (A^T + A) e - (\Delta R_s \Delta A_s \hat{X} + \Delta R_r \Delta A_r \hat{X})^T e - \\ &- e^T (\Delta R_s \Delta A_s \hat{X} + \Delta R_r \Delta A_r \hat{X}) + 2 \frac{\Delta R_s}{\lambda_s} \frac{d\hat{R}_s}{dt} + 2 \frac{\Delta R_r}{\lambda_r} \frac{d\hat{R}_r}{dt} = S_1 + S_2 + S_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Виділяємо у виразі (11) три доданки

$$\frac{dV}{dt} = S_1 + S_2 + S_3, \quad (12)$$

де

$$S_1 = e^T [A^T + A] e, \quad (13)$$

$$S_2 = -(\Delta R_s \Delta A_s \hat{X})^T e - e^T (\Delta R_s \Delta A_s \hat{X}) + \frac{2\Delta R_s}{\lambda_s} \frac{d\hat{R}_s}{dt}, \quad (14)$$

$$S_3 = -(\Delta R_r \Delta A_r \hat{X})^T e - e^T (\Delta R_r \Delta A_r \hat{X}) + \frac{2\Delta R_r}{\lambda_r} \frac{d\hat{R}_r}{dt}. \quad (15)$$

Матриця квадратичної форми S_1 дорівнює $K = A^T + A$. Досліджуємо квадратичну форму S_1 на негативну визначеність. З урахуванням формул (4) матриця K приймає вигляд

$$K = \begin{pmatrix} -2a_{11} & 0 & a_{13} + a_{31} & a_{23}\omega \\ 0 & -2a_{11} & -a_{23}\omega & a_{13} + a_{31} \\ a_{13} + a_{31} & -a_{23}\omega & -2a_{33} & 0 \\ a_{23}\omega & a_{13} + a_{31} & 0 & -2a_{33} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Застосуємо критерій Сильвестра. Відповідно до цього критерію для негативної визначеності квадратичної форми необхідно і достатньо, щоб кутові мінори парного порядку її матриці були позитивні, а непарного порядку — негативні. Коефіцієнти матриці (16) залежать від швидкості обертання вала АМ. Тому в загальному випадку головні мінори матриці (16) будуть поліномами кутової швидкості ротора ω .

Перший і другий мінори не залежать від швидкості та дорівнюють

$$\Delta_1 = -2a_{11} < 0, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} -2a_{11} & 0 \\ 0 & -2a_{11} \end{vmatrix} = 4a_{11}^2 > 0. \quad (17)$$

Третій головний міnor приймає вигляд

$$\Delta_3(\omega) = 4a_{11}^2(a_{13} + a_{31} + 2a_{33}) - 2a_{11}a_{23}^2\omega^2. \quad (18)$$

У функції швидкості цей міnor є параболою з точкою максимуму при $\omega = 0$, яка приймає нульові значення при швидкостях

$$\omega_{1,2} = \pm \frac{\sqrt{2a_{11}(a_{13} + a_{31} + 2a_{33})}}{a_{23}}. \quad (19)$$

Величини швидкостей, визначені за формулою (19), є незначними і для АМ серії 4А знаходяться в межах $\omega_{1,2} = \pm(2.2 \div 2.5)c^{-1}$. Тоді інтервали негативності третього головного мінору наступні

$$\Delta_3(\omega) < 0 \text{ при } \omega \in (-\infty, -|\omega_{1,2}|) \cup (|\omega_{1,2}|, +\infty). \quad (20)$$

Четвертий головний міnor має вигляд

$$\Delta_4(\omega) = a + b\omega^2 + c\omega^4, \quad (21)$$

де

$$a = 16a_{11}^2a_{33}^2 - 8a_{11}a_{33}a_{13}^2 - 16a_{11}a_{33}a_{31}a_{13} - 8a_{11}a_{33}a_{31}^2 + a_{13}^4 + 4a_{31}a_{13}^3 + 6a_{13}^2a_{31}^2 + 4a_{13}a_{31}^3 + a_{31}^4 > 0;$$

$$b = 2a_{23}^2a_{13}^2 - 8a_{23}^2a_{11}a_{33} + 4a_{23}^2a_{31}a_{13} + 2a_{23}^2a_{31}^2 > 0; \quad (22)$$

$$c = a_{23}^4 > 0.$$

З виразів (21), (22) випливає, що знак четвертого головного мінору не залежить від швидкості та його значення при будь-яких швидкостях більше нуля, тобто

$$\Delta_4(\omega) > 0. \quad (23)$$

Таким чином, квадратична форма S_1 зі своєю матрицею без зворотних зв'язків $K = A^T + A$ негативно визначена при будь-яких значеннях швидкостей ротора АМ, крім вузького інтервалу $\omega \in (-|\omega_{1,2}|, |\omega_{1,2}|)$ в околиці нульової швидкості. Тому при синтезі алгоритмів ідентифікації активних опорів фаз статора та ротора АМ можна приймати розімкнутий спостерігач поточкозчеплення вигляду (2), якщо в електроприводі відсутня необхідність реверсу швидкості та стабілізації її на низьких рівнях у діапазоні нестійкості $\omega \in (-|\omega_{1,2}|, |\omega_{1,2}|)$.

Дорівнюємо доданки S_2 і S_3 нулю й одержимо

$$S_2 = -e^T(\Lambda A_s \hat{X}) + \frac{1}{\lambda_s} \frac{d\hat{R}_s}{dt} = 0, \quad S_3 = -e^T(\Lambda A_r \hat{X}) + \frac{1}{\lambda_r} \frac{d\hat{R}_r}{dt} = 0. \quad (24)$$

Тоді закони адаптації приймають вигляд

$$\hat{R}_s = \lambda_s \int (e^T \Lambda A_s \hat{X}) dt, \quad (25)$$

$$\hat{R}_r = \lambda_r \int (e^T \Lambda A_r \hat{X}) dt. \quad (26)$$

Спершу знайдемо наступний вираз

$$\Lambda A_s \hat{X} = \begin{pmatrix} -\bar{a}'_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\bar{a}'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{s\alpha} \\ \hat{I}_{s\beta} \\ \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\bar{a}'_{11}\hat{I}_{s\alpha} \\ -\bar{a}'_{11}\hat{I}_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Підінтегральний вираз у формулі (25) набуває вигляду

$$e^T \Delta A_s \hat{X} = \begin{bmatrix} \Delta I_{s\alpha} & \Delta I_{s\beta} & \Delta \Psi_{r\alpha} & \Delta \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} -\bar{a}_{11}' \hat{I}_{s\alpha} \\ -\bar{a}_{11}' \hat{I}_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = -\bar{a}_{11}' (\hat{I}_{s\alpha} \Delta I_{s\alpha} + \hat{I}_{s\beta} \Delta I_{s\beta}). \quad (28)$$

Тоді алгоритм ідентифікації активного опору статора (25) описується виразом

$$\hat{R}_s = -\lambda_s \bar{a}_{11}' \int [(I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha}) \hat{I}_{s\alpha} + (I_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta}) \hat{I}_{s\beta}] dt. \quad (29)$$

Обчислюємо підінтегральний вираз формули (26):

$$\Delta A_r \hat{X} = \begin{pmatrix} -\bar{a}_{11}'' & 0 & \bar{a}_{13} & 0 \\ 0 & -\bar{a}_{11}'' & 0 & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{31} & 0 & -\bar{a}_{33} & 0 \\ 0 & \bar{a}_{31} & 0 & -\bar{a}_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{s\alpha} \\ \hat{I}_{s\beta} \\ \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\alpha} + \bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ -\bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\beta} + \bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\beta} \\ \bar{a}_{31} \hat{I}_{s\alpha} - \bar{a}_{33} \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \bar{a}_{31} \hat{I}_{s\beta} - \bar{a}_{33} \hat{\Psi}_{r\beta} \end{pmatrix}. \quad (30)$$

Підінтегральний вираз у формулі (26) приймає вигляд

$$e^T \Delta A_r \hat{X} = \begin{bmatrix} \Delta I_{s\alpha} & \Delta I_{s\beta} & \Delta \Psi_{r\alpha} & \Delta \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} -\bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\alpha} + \bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ -\bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\beta} + \bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\beta} \\ \bar{a}_{31} \hat{I}_{s\alpha} - \bar{a}_{33} \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \bar{a}_{31} \hat{I}_{s\beta} - \bar{a}_{33} \hat{\Psi}_{r\beta} \end{pmatrix} = -\bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\alpha} \Delta I_{s\alpha} + \bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\alpha} \Delta I_{s\alpha} - \\ -\bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\beta} \Delta I_{s\beta} + \bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\beta} \Delta I_{s\beta} + \bar{a}_{31} \hat{I}_{s\alpha} \Delta \Psi_{r\alpha} - \bar{a}_{33} \hat{\Psi}_{r\alpha} \Delta \Psi_{r\alpha} + \bar{a}_{31} \hat{I}_{s\beta} \Delta \Psi_{r\beta} - \bar{a}_{33} \hat{\Psi}_{r\beta} \Delta \Psi_{r\beta}. \quad (31)$$

Алгоритм ідентифікації (26) з підінтегральною функцією (31) працює стійко і якісно. Однак практично виміряти відхилення потокозчеплення $\Delta \Psi_{r\alpha}$ і $\Delta \Psi_{r\beta}$ не видається можливим. Якщо прийняти, що внаслідок зміни активного опору ротора АМ відхилення потокозчеплень істотно менше відхилень струмів, то у виразі (31) усіма доданками з відхиленнями потокозчеплень можна зневажити.

Тоді алгоритм ідентифікації активного опору ротора (26) описується виразом

$$\hat{R}_r = \lambda_r \int (\bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\alpha} \Delta I_{s\alpha} + \bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\beta} \Delta I_{s\beta} - \bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\alpha} \Delta I_{s\alpha} - \bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\beta} \Delta I_{s\beta}) dt. \quad (32)$$

Алгоритм ідентифікації (32) забезпечує стійке й якісне оцінювання опору R_r асинхронної машини за різних режимів роботи, що перевірено методом математичного моделювання.

Підінтегральні вирази у формулах (29), (32) називають функціями адаптації. Позначимо функції адаптації в такий спосіб:

$$Q_s = \hat{I}_{s\alpha} (I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha}) + \hat{I}_{s\beta} (I_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta}); \quad (33)$$

$$Q_r = (\bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\alpha} - \bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\alpha}) (I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha}) + (\bar{a}_{13} \hat{\Psi}_{r\beta} - \bar{a}_{11}'' \hat{I}_{s\beta}) (I_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta}). \quad (34)$$

Додамо до виразів (29) і (32) пропорційні складові та приймемо, що процес ідентифікації починається з номінального рівня опору. Тоді алгоритми ідентифікації активних опорів фазних обмоток статора і ротора АМ записуються виразами

$$\hat{R}_s = R_{sh} - \lambda_{s1} Q_s - \lambda_{s2} \int Q_s dt; \quad (35)$$

$$\hat{R}_r = R_{rh} + \lambda_{r1} Q_r + \lambda_{r2} \int Q_r dt. \quad (36)$$

Параметри $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{r1}, \lambda_{r2}$ представлених ПІ-регуляторів більші нуля та підбираються у процесі настроювання алгоритму ідентифікації шляхом багаторазового розрахунку математичної моделі динаміки замкнутої системи керування з замкнутим параметричним зворотним зв'язком. Структура ПІ-регуляторів (35), (36) значень опорів визначається знайденими виразами функцій адаптації (33), (34).

Алгоритми ідентифікації параметрів досліджувалися у складі релейно-векторної системи керування АМ з орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора. Вимірялися струми та напруги статора, а також кутова швидкість ротора. Для визначення положення опорного вектора потокозчеплення ротора використовувався спостерігач, який описується системою рівнянь (1). Для підвищення точності цього спостерігача до його складу почергово вводилися алгоритми (35), (36) ідентифікації активних опорів статора та ротора АМ. Методом математичного моделювання досліджувалася динаміка векторної системи керування зі спостерігачем (1), у складі якого реалізовано параметричний зворотний зв'язок через алгоритми ідентифікації (35) або (36).

У досліджуваному електроприводі було взята АМ з технічними даними: тип 4A160S4Y3, $P_n = 15 \text{ кВт}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $U_{sn} = 380 \text{ В}$. Спершу вивчалася динаміка системи при роботі тільки алгоритму (35). Здійснювався розгін АМ до сталої швидкості, після чого давалося збільшення опору статора R_s , яке дорівнює його потроєному значенню. Через якийсь час опір R_s відновлювався до його номінального рівня. Результати дослідження наступні. При швидкості близькій до синхронної (150 с^{-1}) та номінальному навантаженні процес ідентифікації є інерційним та існує статична помилка оцінювання. При малих навантаженнях $M_c = 0.2 M_n$ алгоритм (35) втрачає асимптотичну стійкість – оцінка $\hat{R}_s$ іде в негативні значення і коливається біля деякого рівня. При пуску відбувається збурення оцінки $\hat{R}_s$. При швидкості значно менше синхронної (50 с^{-1}) з номінальним навантаженням відсутні збурення при пуску та статичні помилки визначення активного опору статора, тобто $\hat{R}_s \rightarrow R_s$, а при невеликих навантаженнях $M_c = 0.2 M_n$ алгоритм дуже інерційний, практично непрацездатний. При реверсі з будь-яких швидкостей при незмінному знаку моменту статичного навантаження алгоритм (35) втрачає стійкість і $\hat{R}_s \rightarrow \infty$. При пуску в протилежному напрямку обертання з одночасною зміною знака статичного навантаження ідентифікація відбувається задовільно і $\hat{R}_s \rightarrow R_s$. У рівняння спостерігача потоку (1) підставляється величина оцінки активного опору статора $\hat{R}_s$. На рис. 1 показані стрибки завдання активного опору статора АМ синьою лінією та їх відпрацювання алгоритмом (35) – червоною лінією при різних швидкостях і моментах навантаження АМ з релейно-векторним керуванням і спостерігачем потокозчеплення ротора (1). Параметри алгоритму ідентифікації (35) приймалися наступними: $\lambda_{s1} = 0.005$, $\lambda_{s2} = 0.36$. Без пропорційної складової перехідний процес ідентифікації $\hat{R}_s$ ще більш тривалий.

Також вивчалася динаміка системи при роботі окремо алгоритму (36). Здійснювався розгін АМ до сталої швидкості, після чого давалося збільшення опору ротора R_r , яке дорівнює його потроєному значенню. Через якийсь час опір R_r відновлювався до його номінального рівня. При номінальній швидкості та навантаженні з подальшим реверсом при незмінному знаку статичного моменту алгоритм стійкий та не виявляє властивості інерційності, тобто оцінка опору ротора швидко досягає оцінюваного параметра $\hat{R}_r \rightarrow R_r$.

На середніх і низьких швидкостях з реверсом або без нього з різними значеннями і знаками моменту навантаження оцінка $\hat{R}_r$ швидко та точно досягає оцінюваного параметра R_r . На усіх режимах присутня асимптотична стійкість алгоритму ідентифікації активного опору ротора. Тільки при швидкості ротора, близькій до синхронної, та незначних навантаженнях можуть з'являтися автоколивання оцінки $\hat{R}_r$ біля значення оцінюваного параметра R_r . У рівняння спостерігача потоку (1) підставляється величина оцінки активного опору ротора $\hat{R}_r$. На рис. 2 представлені перехідні процеси швидкості та електромагнітного моменту в релейно-векторній системі керування АМ з спостерігачем потокозчеплення ротора, в якому діє алгоритм (36) ідентифікації активного опору ротора. На рис. 3 показано стрибки завдання активного опору ротора АМ синьою лінією та їх відпрацювання алгоритмом (36) – червоною лінією, при

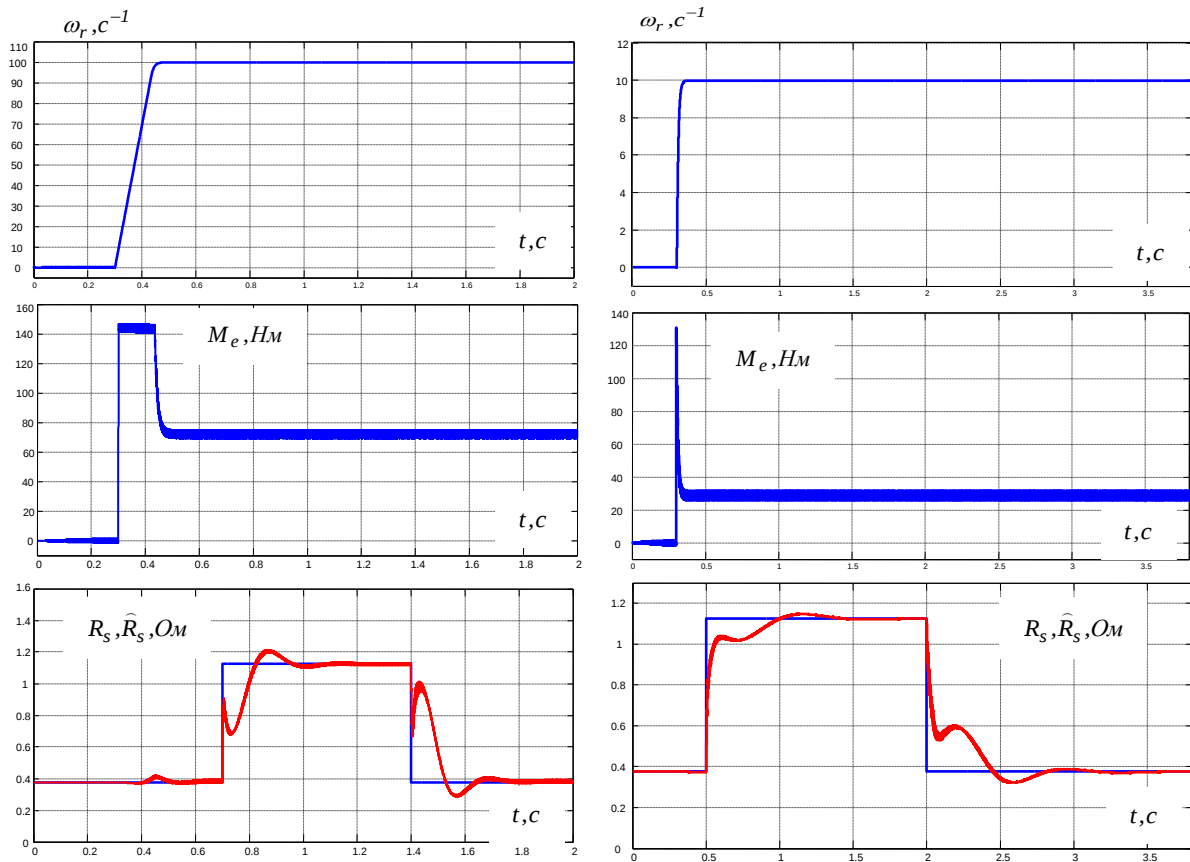


Рис. 1. Ідентифікація активного опору статора в спостерігачі потокозчеплення ротора при різних швидкостях і навантаженнях

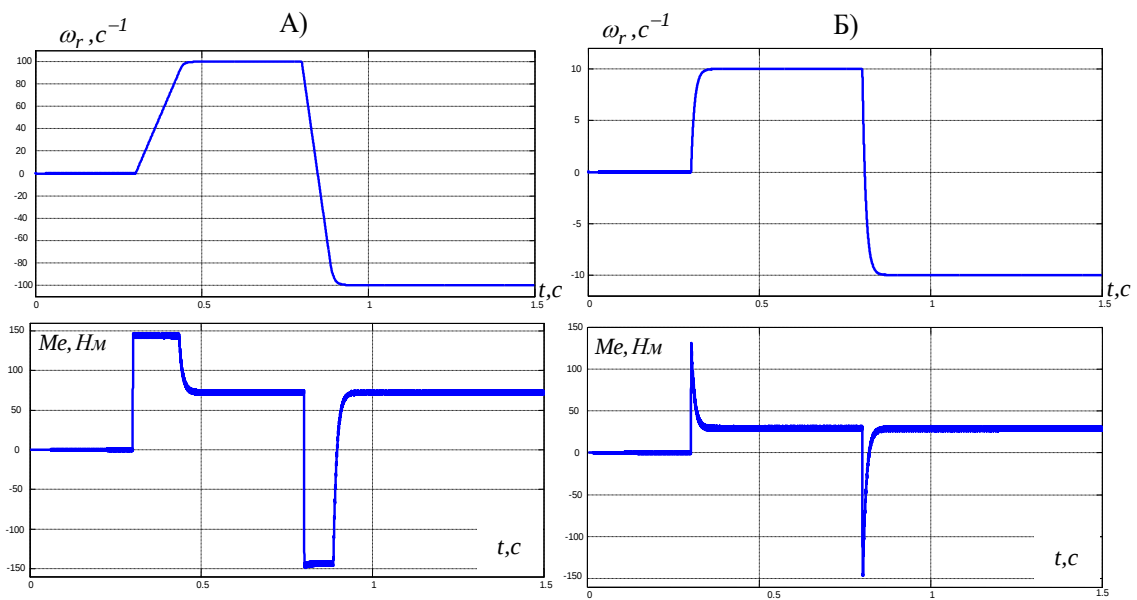


Рис. 2. Перехідні процеси швидкості та електромагнітного моменту в релейно-векторній системі керування АМ зі спостерігачем потокозчеплення ротора та ідентифікацією активного опору ротора

різних швидкостях та моментах навантаження АМ з релейно-векторним керуванням і спостерігачем потокозчеплення ротора (1). Параметри алгоритму ідентифікації (36) приймалися наступними: $\lambda_{r1} = 0.0001$, $\lambda_{r2} = 0.12$. Графіки на рис. 3, що позначені буквами А) і Б), відповідають перехідним процесам кутової швидкості ротора й електромагнітного моменту під тими ж буквами на рис. 2. З аналізу перехідних процесів можна заключити, що ідентифікація активного опору ротора за алгоритмом (36) протікає значно більш інтенсивно, ніж ідентифікація активного опору статора за алгоритмом (35). Алгоритм ідентифікації активного опору ротора (36) асимптотично стійкий практично при будь-яких режимах роботи АМ та різних поєднаннях кутової швидкості ротора й електромагнітного моменту. У той же час, алгоритм ідентифікації (35) має більш вузьку область застосування, оскільки не передбачає можливості реверсу швидкості та роботи на швидкості, що наближається до синхронної з малим навантаженням, тому що не забезпечує на цих режимах асимптотичну стійкість ідентифікації активного опору статора.

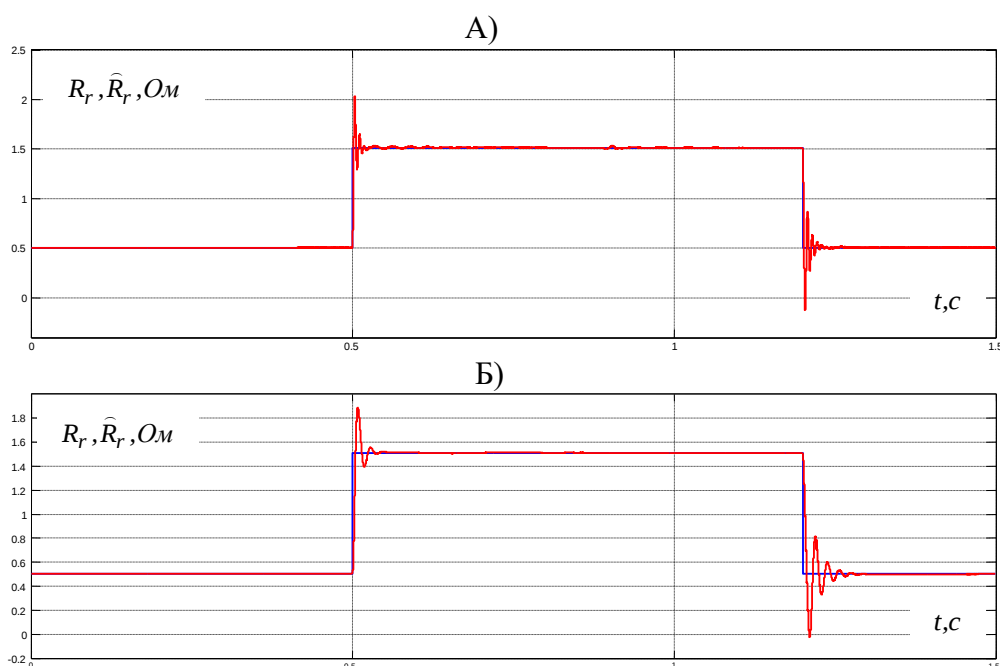


Рис. 3. Перехідні процеси ідентифікації активного опору ротора АМ, яка реалізується алгоритмом (36)

Висновки

У статті на основі другої теореми Ляпунова про стійкість руху отримані структури алгоритмів ідентифікації активних опорів статора та ротора АМ, що входять як параметри до спостерігача потокозчеплення ротора при релейно-векторному керуванні АМ за колом статора. Алгоритми ідентифікації формувалися як ПІ регулятори від функцій адаптації, аналітичний запис яких знайдено з умов стійкості руху за Ляпуновим. Параметри ПІ регуляторів, що здійснюють ідентифікацію активних опорів АМ з метою підвищення точності спостерігача потокозчеплення ротора, підбиралися шляхом багаторазового розрахунку математичної моделі електропривода та вибору найкращого варіанта за показниками якості перехідного процесу ідентифікації. Визначено умови та характеристики режимів електропривода, при яких алгоритми ідентифікації (35) та (36) зберігають асимптотичну стійкість.

Список використаної літератури

1. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Дослідження чутливості спостерігача потокозчеплення ротора до зміни параметрів асинхронної машини. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2021, Вип. 1 (38). С. 57–67., DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.7
2. Sadovoi A.V., Klyuyev O.V., Pletenets V.R., Rybalka O.O. Information support for process observing flux linkage of the rotor asynchronous motor/ *Herald of advanced information technology*, Odessa, 2021. Vol. 4, No.1. pp. 57-66. DOI: 10.15276/hait.01.2021.5
3. Ключев О.В., Садовой А.В., Сохина Ю.В. Идентификация координат и параметров асинхронной машины при векторном управлении по цепи ротора. *Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета (технические науки)*. Днепропетровск, 2007. С. 361–365.
4. Сёмин А.А. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с низкой чувствительностью к наличию ошибок в исходных экспериментальных данных. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2017. 27(1249). С.118–121.
5. Пересада С.М., Коноплінський М.А. Ідентифікація активних опорів асинхронного двигуна за допомогою адаптивного спостерігача потокозчеплення/ *Технічна електродинаміка*, 2013. № 1, С. 40–48.
6. Пересада С.М., Ніконенко Є.О., Ковбаса С.М., Кузнецов О.С. Спостерігач потокозчеплення адаптивний до змін активного опору ротора асинхронних двигунів/ *Технічна електродинаміка*, 2022. № 5, С. 45–51. DOI: 10.15407/techned2022.05.045
7. Koubaa Y. Recursive identification of induction motor parameters/ *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2004. № 12, pp. 363–381.
8. Yung-Chang Luo, Jian-Chien Tsai, Hao-You Huang, Wen-Cheng Pu Speed prediction direct-torque-controlled induction motor drive based on motor resistance parameter identification/ *Sensors and Materials*, 2024. Vol. 36, No. 6. pp. 2643–2654. DOI: 10.18494/SAM4838
9. Moutchou M., Mahmoudi H. Sensorless exact input-output linearization control of the induction machine, based on parallel stator resistance and speed MRAS observer, with a flux sliding mode observer/ *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2014. Vol. 6, No. 2. pp. 324-341. DOI:10.15676/IJEEI.2014.6.2.8

FLUX LINKAGE OBSERVER WITH IDENTIFICATION OF ACTIVE RESISTANCES OF AN ASYNCHRONOUS MACHINE

Abstract

Sensorless vector asynchronous electric drives are currently being developed and studied because they are cheaper and more reliable than control systems using physical sensors of flux linkage and rotor angular speed. Vector control systems of an asynchronous machine by the stator are most often oriented by the rotor flux linkage vector, for the identification of which various observers are used. For the exact identification of the spatial position of the flux linkage vector it is necessary that the parameters of the asynchronous machine coincide with the parameters of the observer. However as a result of heating the phase windings of the asynchronous machine (AM), their active resistances increase. In this case, it is necessary to identify the active resistances of the electric machine and use the obtained parameter estimates in the flux linkage observer equations to improve the accuracy of determining the angle of rotation of the flux linkage vector. From the stability conditions formulated in the second Lyapunov theorem on the stability of motion, it is possible to obtain analytical expressions called adaptation functions, the integrals of which are estimates of the active resistances of the stator and rotor of the asynchronous machine. A proportional component is added to the integral component, and PI controllers are obtained, the input signals of which are calculated in accordance with the adaptation functions, and the output signals will asymptotically approach the estimated parameters of the active resistances of the AM. The described technique allows one to find the structure of identification

algorithms, and their parameters are selected by multiple calculations of the mathematical model of the AM with the control system. The areas of asymptotic stability of the algorithms are determined from the condition of negative certainty of the derivative of the Lyapunov function on the trajectories of the flux linkage observer. A comparative analysis of the quality indicators of transient processes of identification of the active resistance of the stator and rotor during speed control with different load moments in the relay-vector control system of an asynchronous machine is carried out.

References

- [1] Kliuiev O.V., Sadovoi O.V. & Sokhina Yu.V. (2021) «*Doslidzhennia chutlyvosti sposterihacha potokozcheplennia rotora do zminy parametriv asynkhronnoi mashyny*» [Research sensitivity of the rotor flux linkage observer to change parameters of the asynchronous machine] Collection of scholarly papers of Dniprovsky State Technical University (Technical sciences). Kamianske: Vol. 1 (38), pp. 57-67. DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.7 [in Ukrainian].
- [2] Sadovoi A.V., Klyuyev O.V., Pletenets V.R. & Rybalka O.O. (2021) *Information support for process observing flux linkage of the rotor asynchronous motor*. Herald of advanced information technology, Odessa: Vol. 4, No.1, pp. 57-66, DOI: 10.15276/hait.01.2021.5
- [3] Kliuiev O.V., Sadovoi O.V. & Sokhina Yu.V. (2007) «*Identifikaciya koordinat i parametrov asinhronnoj mashiny pri vektornom upravlenii po cepi rotora*» [Identification of coordinates and parameters of an asynchronous machine with vector control over the rotor circuit] Collection of scholarly papers of Dneprodzerzhinsk State Technical University (Technical sciences). Dneprodzerzhinsk: 2007, pp. 361–365, [in Russian].
- [4] Syomin A.A. (2017) «*Identifikaciya parametrov shemy zamesheniya asinhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom s nizkoj chuvstvitelnostyu k nalichiyu oshibok v ishodnyh eksperimentalnyh dannyh*» [Identification of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor with low sensitivity to the presence of errors in the initial experimental data] Bulletin of NTU "KhPI", 2017, Vol. 27(1249), pp.118–121, [in Russian].
- [5] Peresada S.M. & Konopliynskyi M.A. (2013) «*Identifikatsiia aktyvnykh oporiv asynkhronnoho dvyhuna za dopomohoiu adaptivnoho sposterihacha potokozcheplennia*» [Identification of active resistances of an induction motor using an adaptive flux linkage observer] Technical electrodynamics, 2013, Vol.1, pp.40–48, [in Ukrainian].
- [6] Peresada S.M., Nikonenko Ye.O., Kovbasa S.M. & Kuznietsov O.S. (2022) «*Sposterihach potokozcheplennia adaptivnyi do zmin aktyvnogo oporu rotora asynkhronnykh dvyhuniv*» [Flux coupling observer adaptive to changes in rotor resistance of induction motors] Technical electrodynamics, Vol.5, pp.45-51. DOI: 10.15407/techned2022.05.045 [in Ukrainian].
- [7] Koubaa Y. (2004) *Recursive identification of induction motor parameters*. Simulation Modelling Practice and Theory. 2004, No.12, pp. 363–381
- [8] Yung-Chang Luo, Jian-Chien Tsai, Hao-You Huang & Wen-Cheng Pu (2024) *Speed prediction direct-torque-controlled induction motor drive based on motor resistance parameter identification*. Sensors and Materials. Vol. 36, No. 6, pp. 2643–2654. DOI: 10.18494/SAM4838
- [9] Moutchou M. & Mahmoudi H. (2014) *Sensorless exact input-output linearization control of the induction machine, based on parallel stator resistance and speed MRAS observer, with a flux sliding mode observer*. International Journal on Electrical Engineering and Informatics. Vol. 6, No.2, pp. 324–341. DOI:10.15676/IJEEI.2014.6.2.8

Надійшла до редколегії 05.12.2024