

DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.7

УДК 62-83:681.513.5

О.В. Ключев¹, к.т.н., доцент, kluev2006@ukr.net

О.В. Садовой², д.т.н., професор, sadovoyav@ukr.net

Ю.В. Сохіна¹, к.т.н., доцент, jvsokhina@gmail.com

¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ СПОСТЕРІГАЧА ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ РОТОРА ДО ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

У роботі вирішена актуальна наукова задача, яка полягає в розробці математичної моделі розрахунку сталих значень функцій чутливості координат спостерігача потокозчеплення ротора до зміни параметрів асинхронної машини. Оскільки об'єкт і система керування істотно нелінійні, модель не містить передатних функцій, а побудована шляхом об'єднання рівнянь моделі чутливості спостерігача і моделі статички асинхронної машини. Отримані результати показують як змінюються коефіцієнти передачі в залежності від швидкості ротора. Запропонована методика дозволяє знаходити числові значення коефіцієнтів передачі і порівнювати ступінь впливу різних параметрів асинхронної машини на координати спостерігача потоку. Проведені розрахунки спрямовані на збільшення глибини аналізу властивостей спостерігача потокозчеплення, що надалі допомагає обґрунтовано вибрати структуру зворотних зв'язків при синтезі замкненого спостерігача.

Ключові слова: асинхронна машина; спостерігач; потокозчеплення ротора; функція чутливості; внутрішні параметри; вихідні координати.

The work has solved an urgent scientific problem, which consists in the development of a mathematical model for calculating the steady-state values functions sensitivity of the coordinates observer of the rotor flux linkage to the change parameters of the asynchronous machine. Since the object and the control system are essentially nonlinear, the model does not contain transfer functions, but is built by combining the equations of the observer's sensitivity model and the statics model of an asynchronous machine. The results obtained show how the transmission coefficients change depending on the rotor speed. The proposed method allow to find the numerical values of the transmission coefficients and compare the degree of influence of various parameters of an asynchronous machine on the coordinates of the flow observer. The performed calculations are aimed at increasing the depth of analysis of the properties of the flux linkage observer, which further helps to substantiate the choice of the feedback structure in the synthesis of a closed observer.

Key words: asynchronous machine; observer; rotor flux linkage; sensitivity function; internal parameters; output coordinates.

Постановка проблеми

Як правило, об'єкт керування є нестационарним оскільки з часом можуть змінюватися не тільки його параметри, але і структура. Модель об'єкта керування характеризується параметрами, які приймаються за номінальні і використовуються в розрахунку керуючої системи. Тому при зміні параметрів об'єкта для забезпечення необхідної якості керування повинні змінюватися настроювальні параметри керуючої системи. Дослідження чутливості математичних моделей дозволяє глибше досліджувати системи керування, що допомагає правильно вибрати їх технічні параметри [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У численній літературі по теорії керування функція чутливості розглядається як передатна функція між прирощенням параметра і вихідною координатою об'єкта керування [1,2], що дозволяє визначити коефіцієнти впливу як функції часу в перехідних процесах. Однак розвинений математичний апарат передатних функцій можливо застосовувати тільки для лінійних систем [1,2]. Для нелінійних систем функції чутливості не мають аналітичного виразу і їх можли-

во одержати тільки чисельними методами у вигляді масивів точок і відповідних графіків для конкретних систем із заданими параметрами. Це позбавляє чисельні методи універсальності і наочності [3,4]. Спостерігачі потокозчеплення асинхронних машин (АМ) як і самі АМ описуються системами істотно нелінійних диференціальних рівнянь [5—7]. Тому для зазначених об'єктів одержати функції чутливості у вигляді передатних функцій на всьому інтервалі перехідного процесу не представляється можливим [8,9]. Однак можливо спростити задачу з метою одержання її аналітичного розв'язання, наприклад, спробувати знайти сталі значення функцій чутливості, коли вони представляють статичні коефіцієнти передачі між прирощенням параметра і координатою об'єкта [10]. У великій літературі присвяченій синтезу спостерігачів потокозчеплення ротора вказується, що найбільшу чутливість сигнал оцінки потокозчеплення ротора має до зміни активного опору ротора АМ [11—14]. Однак не приводяться числові значення коефіцієнтів передачі між координатами спостерігача і прирощеннями параметрів асинхронної машини в процесі її роботи, що не дозволяє провести порівняльний аналіз ступеня впливу зміни тих або інших параметрів АМ на сигнали спостерігача потоку.

Формулювання мети дослідження

У роботі ставиться задача знайти і порівняти числові значення функцій чутливості координат спостерігача потокозчеплення ротора до зміни параметрів асинхронної машини шляхом спільного аналітичного розв'язання рівнянь статичної моделі чутливості спостерігача і моделі стану асинхронної машини.

Виклад основного матеріалу

Рівняння рівноваги напруг статорних і роторних кіл асинхронної машини в осях u, v мають вигляд [15]:

$$\vec{U}_s = \vec{I}_s R_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \quad \vec{U}_r = \vec{I}_r R_r + \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega)\vec{\Psi}_r. \quad (1)$$

Рівняння потокозчеплення наступні

$$\vec{\Psi}_s = \vec{I}_s L_s + \vec{I}_r L_m; \quad \vec{\Psi}_r = \vec{I}_s L_m + \vec{I}_r L_r. \quad (2)$$

Запишемо рівняння (1) у скалярній формі в осях α, β для АМ з короткозамкненим ротором

$$u_{s\alpha} = p\Psi_{s\alpha} + R_s I_{s\alpha}; \quad u_{s\beta} = p\Psi_{s\beta} + R_s I_{s\beta}. \quad (3)$$

$$0 = p\Psi_{r\alpha} + \omega\Psi_{r\beta} + R_r I_{r\alpha}; \quad 0 = p\Psi_{r\beta} - \omega\Psi_{r\alpha} + R_r I_{r\beta}. \quad (4)$$

Рівняння потокозчеплень (2) приймають вигляд

$$\Psi_{s\alpha} = L_s I_{s\alpha} + L_m I_{r\alpha}; \quad \Psi_{s\beta} = L_s I_{s\beta} + L_m I_{r\beta}. \quad (5)$$

$$\Psi_{r\alpha} = L_r I_{r\alpha} + L_m I_{s\alpha}; \quad \Psi_{r\beta} = L_r I_{r\beta} + L_m I_{s\beta}. \quad (6)$$

Зі співвідношень (6) виражаємо проекції вектора струму ротора

$$I_{r\alpha} = \frac{\Psi_{r\alpha} - L_m I_{s\alpha}}{L_r}; \quad I_{r\beta} = \frac{\Psi_{r\beta} - L_m I_{s\beta}}{L_r}. \quad (7)$$

Підставляємо вирази (7) у формули (5) і після перетворень будемо мати наступне

$$\Psi_{s\alpha} = \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\alpha} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} I_{s\alpha}; \quad \Psi_{s\beta} = \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\beta} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} I_{s\beta}. \quad (8)$$

Одержимо рівняння АМ у вигляді структури $(\vec{\Psi}_r, \vec{I}_s)$, записаної в осях α, β . Для цього спершу у вирази (4) підставимо значення струмів ротора (7) і після перетворень одержимо наступні рівняння потокозчеплень

$$p\Psi_{r\alpha} = -\frac{R_r}{L_r} \Psi_{r\alpha} - \omega\Psi_{r\beta} + R_r K_r I_{s\alpha}; \quad p\Psi_{r\beta} = -\frac{R_r}{L_r} \Psi_{r\beta} + \omega\Psi_{r\alpha} + R_r K_r I_{s\beta}, \quad (9)$$

де $K_r = L_m/L_r$.

Далі диференціюємо вираз (8), після чого маємо

$$p\Psi_{s\alpha} = K_r p\Psi_{r\alpha} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} pI_{s\alpha}; \quad p\Psi_{s\beta} = K_r p\Psi_{r\beta} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} pI_{s\beta}. \quad (10)$$

У рівняння (3) замість похідних від потокозчеплень статора підставимо вирази (10), що приводить до наступних формул

$$u_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + K_r p\Psi_{r\alpha} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} pI_{s\alpha}; \quad u_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + K_r p\Psi_{r\beta} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} pI_{s\beta}. \quad (11)$$

У рівняння (11) замість похідних від проекцій вектора потокозчеплення ротора підставимо їх вирази (9). Після перетворень приходимо до наступних рівнянь для струмів

$$pI_{s\alpha} = \frac{K_r R_r}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{r\alpha} - \frac{(R_s + K_r^2 R_r) L_r}{L_s L_r - L_m^2} I_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \Psi_{r\beta} + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} u_{s\alpha};$$

$$pI_{s\beta} = \frac{K_r R_r}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{r\beta} - \frac{(R_s + K_r^2 R_r) L_r}{L_s L_r - L_m^2} I_{s\beta} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \Psi_{r\alpha} + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} u_{s\beta}. \quad (12)$$

Якщо вимірювати швидкість ω і струми статора $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$, то рівняння (9) можна використовувати як модель спостерігача потокозчеплення ротора. З урахуванням того, що параметри АМ і спостерігача у загальному випадку відрізняються, на основі (9) рівняння спостерігача можна записати в такий спосіб

$$p\hat{\Psi}_{r\alpha} = -\frac{\hat{R}_r}{\hat{L}_r} \hat{\Psi}_{r\alpha} - \omega \hat{\Psi}_{r\beta} + \hat{R}_r K_r I_{s\alpha}; \quad p\hat{\Psi}_{r\beta} = -\frac{\hat{R}_r}{\hat{L}_r} \hat{\Psi}_{r\beta} + \omega \hat{\Psi}_{r\alpha} + \hat{R}_r K_r I_{s\beta}. \quad (13)$$

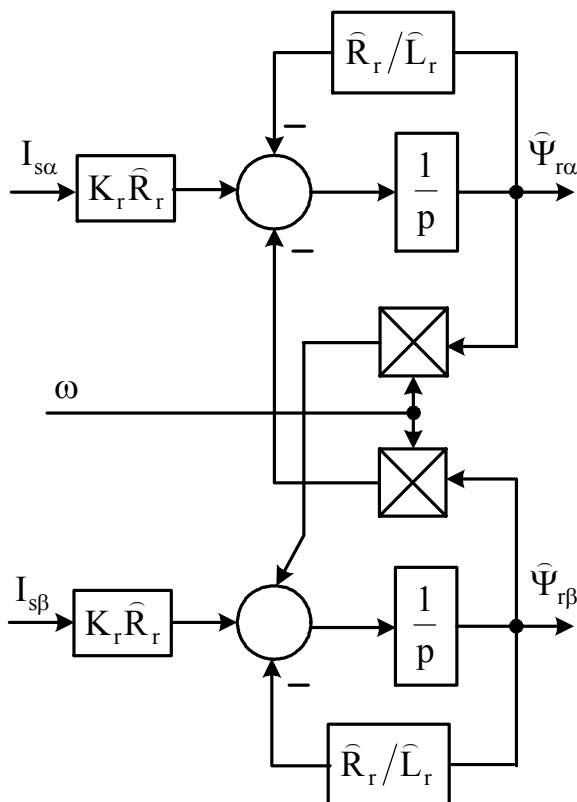


Рис. 1. Структурна схема спостерігача потокозчеплення ротора (13)

У рівняння (13) входять змінні об'єкта керування, які вимірюються безпосередньо датчиками в системі керування АМ і подаються як зовнішні сигнали в спостерігач: швидкість ω і проекції вектора струму статора $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$. Зазначені змінні не позначаються капелюшком. Змінні і параметри які позначаються капелюшком відносяться до самого спостерігача й у загальному випадку можуть не збігатися з відповідними змінними і параметрами АМ. Параметр K_r практично не залежить від ступеня насичення магнітопроводу і залишається величиною постійною і спільною для АМ і спостерігача.

Структурна схема спостерігача потокозчеплення ротора (13) наведена на рис. 1. Зі схеми видно, що для ідентифікації потокозчеплення ротора необхідно вимірювати струми статора і швидкість обертання ротора. До складу спостерігача входить два параметри: активний опір фаз ротора \hat{R}_r і повна індуктивність ротора \hat{L}_r . Ці параметри в асинхронній машині протягом її роботи можуть змінюватися, що приводить до неузгодженості зазначених параметрів в АМ і спостерігачі.

Здійснимо аналіз чутливості змінних стану спостерігача $\widehat{\Psi}_{r\alpha}$, $\widehat{\Psi}_{r\beta}$ до зміни параметрів R_r і L_r АМ. Данні про тенденцію зміни поведінки і якості системи в залежності від зміни параметрів, одержувані в результаті аналізу чутливості, є дуже цінними для розв'язання ряду задач автоматичного керування.

Розглянемо наступну задачу. Дано проекції ξ_u і ξ_v вектора $\vec{\xi}$ на осі u , v . У результаті розв'язання рівнянь моделі чутливості знаходяться функції чутливості $\frac{\partial \xi_u}{\partial \alpha}$ і $\frac{\partial \xi_v}{\partial \alpha}$, де α — змінний внутрішній параметр об'єкта. Потрібно визначити функції чутливості по параметру α для модуля вектора $\vec{\xi}$ і кута його повороту щодо осі u . Якщо $\xi = \sqrt{\xi_u^2 + \xi_v^2}$, то можна записати функцію чутливості модуля вектора до параметра α через функції чутливості його проекцій [15]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial \alpha} = \frac{\xi_u}{\xi} \frac{\partial \xi_u}{\partial \alpha} + \frac{\xi_v}{\xi} \frac{\partial \xi_v}{\partial \alpha} = \cos \delta \frac{\partial \xi_u}{\partial \alpha} + \sin \delta \frac{\partial \xi_v}{\partial \alpha}, \quad (14)$$

де δ — кут між вектором $\vec{\xi}$ і віссю u .

Кут δ можна представити в такий спосіб $\delta = \arcsin\left(\frac{\xi_v}{\xi}\right)$. Тоді після перетворень функція чутливості кута повороту вектора $\vec{\xi}$ до зміни параметра α прийме вигляд [15]:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \alpha} = \frac{\frac{\partial \xi_v}{\partial \alpha} - \sin \delta \left(\cos \delta \frac{\partial \xi_u}{\partial \alpha} + \sin \delta \frac{\partial \xi_v}{\partial \alpha} \right)}{\xi_u} = \frac{\frac{\partial \xi_v}{\partial \alpha} - \sin \delta \frac{\partial \xi}{\partial \alpha}}{\xi_u}. \quad (15)$$

Для визначення ступеня впливу параметрів R_r і L_r на вихідні координати спостерігача $\widehat{\Psi}_{r\alpha}$, $\widehat{\Psi}_{r\beta}$ необхідно обчислювати функції чутливості змінних до зміни параметрів. Ці функції знаходяться в результаті розв'язання рівнянь моделі чутливості, яка отримується диференціюванням рівнянь математичної моделі спостерігача (13) відносно параметрів, що варіюються.

Тоді диференціальні рівняння чутливості до параметра R_r запишуться в такий спосіб

$$\begin{aligned} p \left(\frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial R_r} \right) &= -\frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial R_r} - \omega \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{L_r} + K_r I_{s\alpha} \\ p \left(\frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r} \right) &= \omega \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial R_r} - \frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r} - \frac{\Psi_{r\beta}}{L_r} + K_r I_{s\beta}. \end{aligned} \quad (16)$$

Диференціальні рівняння чутливості до параметра L_r запишуться так

$$p \left(\frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial L_r} \right) = -\frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial L_r} - \omega \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r} + \frac{R_r}{L_r^2} \Psi_{r\alpha}; \quad p \left(\frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r} \right) = \omega \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial L_r} - \frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r} + \frac{R_r}{L_r^2} \Psi_{r\beta}. \quad (17)$$

Якщо об'єднати рівняння (9) і (12), то одержимо систему рівнянь електромагнітних процесів в АМ. При постійній кутовій швидкості така система рівнянь стає лінійною. У сталому режимі роботи система рівнянь електромагнітних контурів АМ в осях α, β (9), (12) приймає вигляд:

$$-\frac{R_r}{L_r} \Psi_{r\alpha} + K_r R_r I_{s\alpha} - \omega \Psi_{r\beta} = 0; \quad -\frac{R_r}{L_r} \Psi_{r\beta} + K_r R_r I_{s\beta} + \omega \Psi_{r\alpha} = 0; \quad (18)$$

$$\left(R_s + K_r^2 R_r \right) I_{s\alpha} - \frac{K_r R_r}{L_r} \Psi_{r\alpha} - K_r \omega \Psi_{r\beta} = u_{s\alpha}; \quad \left(R_s + K_r^2 R_r \right) I_{s\beta} - \frac{K_r R_r}{L_r} \Psi_{r\beta} + K_r \omega \Psi_{r\alpha} = u_{s\beta}.$$

При постійній швидкості ω система (18) перетворюється в систему чотирьох лінійних рівнянь з чотирма невідомими. У результаті розв'язання системи (18) методом Крамера знаходяться змінні $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$, які дорівнюють:

$$\begin{aligned} I_{s\alpha} &= \frac{u_{s\alpha}}{R_s}; \quad I_{s\beta} = \frac{u_{s\beta}}{R_s}; \\ \Psi_{r\alpha} &= \frac{R_r K_r}{R_s} (u_{s\alpha} R_r - u_{s\beta} \omega L_r) \frac{L_r}{R_r^2 + \omega^2 L_r^2}; \\ \Psi_{r\beta} &= \frac{R_r K_r}{R_s} (u_{s\beta} R_r + u_{s\alpha} \omega L_r) \frac{L_r}{R_r^2 + \omega^2 L_r^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

З двох останніх виразів (19) визначається модуль вектора потокозчеплення ротора

$$\Psi_r = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2} = \frac{K_r R_r L_r U_s}{R_s \sqrt{R_r^2 + \omega^2 L_r^2}}. \quad (20)$$

Щоб з'ясувати який параметр спостерігача й у якому напрямку сильніше за все впливає на його змінні стану потрібно розрахувати функції чутливості. Визначимо сталі значення функцій чутливості. Для цього запишемо рівняння моделей чутливості (16), (17) у статиці, які приймають наступний вигляд:

по параметру активного опору ротора

$$-\frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial R_r} - \omega \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r} = \frac{\Psi_{r\alpha}}{L_r} - K_r I_{s\alpha}; \quad \omega \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial R_r} - \frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r} = \frac{\Psi_{r\beta}}{L_r} - K_r I_{s\beta}, \quad (21)$$

по параметру повної індуктивності ротора

$$-\frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial L_r} - \omega \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r} = -\frac{R_r}{L_r^2} \Psi_{r\alpha}; \quad \omega \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial L_r} - \frac{R_r}{L_r} \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r} = -\frac{R_r}{L_r^2} \Psi_{r\beta}. \quad (22)$$

Якщо систему рівнянь (21) розв'язати відносно двох функцій чутливості $\partial \Psi_{r\alpha} / \partial R_r$, $\partial \Psi_{r\beta} / \partial R_r$ попередньо підставивши замість потокозчеплень $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ і струмів $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ їх значення (19), то після перетворень одержимо наступні формули:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial R_r} &= \frac{K_r L_r^2 \omega (R_r^2 u_{s\beta} + 2 R_r L_r \omega u_{s\alpha} - L_r^2 \omega^2 u_{s\beta})}{R_s (R_r^2 + L_r^2 \omega^2)^2}; \\ \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r} &= \frac{K_r L_r^2 \omega (-R_r^2 u_{s\alpha} + 2 R_r L_r \omega u_{s\beta} + L_r^2 \omega^2 u_{s\alpha})}{R_s (R_r^2 + L_r^2 \omega^2)^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Визначимо функцію чутливості модуля вектора потокозчеплення ротора до активного опору ротора, тобто значення похідної $\partial \Psi_r / \partial R_r$, використовуючи формулу (14), що стосовно до нашої задачі запишеться так

$$\frac{\partial \Psi_r}{\partial R_r} = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_r} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial R_r} + \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_r} \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r}. \quad (24)$$

Підставляємо у формулу (24) потокозчеплення з (19), (20), похідні від потокозчеплень (23) і після перетворень одержуємо результат

$$\frac{\partial \Psi_r}{\partial R_r} = \frac{K_r L_r^3 \omega^2 U_s}{R_s \sqrt{(R_r^2 + L_r^2 \omega^2)^3}}. \quad (25)$$

Тепер можливо знайти чутливість кута повороту вектора потокозчеплення ротора до активного опору ротора, тобто значення похідної $\partial \delta / \partial R_r$, використовуючи формулу (15), яка стосовно до нашої задачі запишеться так

$$\frac{\partial \delta}{\partial R_r} = \left(\frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial R_r} - \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_r} \frac{\partial \Psi_r}{\partial R_r} \right) / \Psi_{r\alpha}. \quad (26)$$

Підставляємо у формулу (26) вирази (19), (20), (23), (25) і після перетворень будемо мати

$$\frac{\partial \delta}{\partial R_r} = - \frac{L_r \omega}{R_r^2 + L_r^2 \omega^2}. \quad (27)$$

Якщо систему рівнянь (22) розв'язати відносно двох функцій чутливості $\partial \Psi_{r\alpha} / \partial L_r$, $\partial \Psi_{r\beta} / \partial L_r$ попередньо підставивши замість потокозчеплень $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ їх значення (19), то після перетворень одержимо наступні формули:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial L_r} &= \frac{K_r R_r^2 (R_r^2 u_{s\alpha} - 2R_r L_r \omega u_{s\beta} - L_r^2 \omega^2 u_{s\alpha})}{R_s (R_r^2 + L_r^2 \omega^2)^2}, \\ \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r} &= \frac{K_r R_r^2 (R_r^2 u_{s\beta} + 2R_r L_r \omega u_{s\alpha} - L_r^2 \omega^2 u_{s\beta})}{R_s (R_r^2 + L_r^2 \omega^2)^2}. \end{aligned} \quad (28)$$

Визначимо чутливість модуля вектора потокозчеплення ротора до повної індуктивності ротора, тобто значення похідної $\partial \Psi_r / \partial L_r$, використовуючи формулу (14), що стосовно до нашої задачі запишеться так

$$\frac{\partial \Psi_r}{\partial L_r} = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_r} \frac{\partial \Psi_{r\alpha}}{\partial L_r} + \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_r} \frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r}. \quad (29)$$

Підставляємо у формулу (29) потокозчеплення з (19), (20), похідні від потокозчеплень (28) і після перетворень одержуємо результат

$$\frac{\partial \Psi_r}{\partial L_r} = \frac{K_r R_r^3 U_s}{R_s \sqrt{(R_r^2 + L_r^2 \omega^2)^3}}. \quad (30)$$

Тепер можливо знайти чутливість кута повороту вектора потокозчеплення ротора до повної індуктивності ротора, тобто значення похідної $\partial \delta / \partial L_r$, використовуючи формулу (15), що стосовно до нашої задачі запишеться так

$$\frac{\partial \delta}{\partial L_r} = \left(\frac{\partial \Psi_{r\beta}}{\partial L_r} - \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_r} \frac{\partial \Psi_r}{\partial L_r} \right) / \Psi_{r\alpha}. \quad (31)$$

Підставляємо у формулу (31) вираження (19), (20), (28), (30) і після перетворень будемо мати

$$\frac{\partial \delta}{\partial L_r} = \frac{R_r \omega}{R_r^2 + L_r^2 \omega^2}. \quad (32)$$

Таким чином, одержали вирази (25), (27), (30), (32) для обчислення сталих значень функцій чутливості координат спостерігача до зміни параметрів АМ. Для визначення числових значень похідних від координат по параметрах (функції чутливості) була узятa АМ типу 4A132M4У3 з наступними паспортними даними: $P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_{sn} = 380 \text{ В}$; $n_c = 1500 \text{ об/хв}$. Параметри АМ обчислювалися за даними, узятим з довідника [16].

Обчислення показали, що функції чутливості залежать від швидкості і на них не впливає момент навантаження. Функція чутливості (25) має екстремум (максимум) за швидкістю.

Координата точки максимуму знаходиться в результаті розв'язання рівняння $\frac{d}{d\omega} \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial R_r} \right) = 0$ і

дорівнює

$$\omega_{екст} = \sqrt{2} R_r / L_r. \quad (33)$$

Значення функції чутливості (25) у точці максимуму дорівнює

$$\left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial R_r}\right)_{max} = \frac{2K_r L_r U_s}{\sqrt{27} R_s R_r}. \quad (34)$$

Функція чутливості (30) монотонно спадає за швидкістю і екстремумів не має. Її максимальне значення на початку координат дорівнює

$$\left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial L_r}\right)_{max} = \frac{K_r U_s}{R_s}. \quad (35)$$

Функція чутливості (27) має мінімум, а функція чутливості (32) — максимум при одному значенні швидкості

$$\omega_{екст} = R_r / L_r. \quad (36)$$

Екстремальні значення функцій чутливості (27) і (32) наступні

$$\left(\frac{\partial \delta}{\partial R_r}\right)_{min} = -\frac{1}{2R_r}; \quad \left(\frac{\partial \delta}{\partial L_r}\right)_{max} = \frac{1}{2L_r}. \quad (37)$$

Графіки функцій (25), (27) і (32) представлені на рис. 2. Функції побудовані для значень швидкостей від нульової до синхронної. Графіки показують, що функції чутливості швидко досягають своїх екстремальних значень, у вузькому діапазоні малих швидкостей мають досить великі значення і в міру збільшення швидкості після проходження екстремуму також швидко спадають до малих значень. Для номінальної швидкості вийшли наступні числові значення функцій чутливості: $\partial \Psi_r / \partial R_r = 2,693$; $\partial \delta / \partial R_r = -0,018$; $\partial \Psi_r / \partial L_r = 0,00064$; $\partial \delta / \partial L_r = 0,051$.

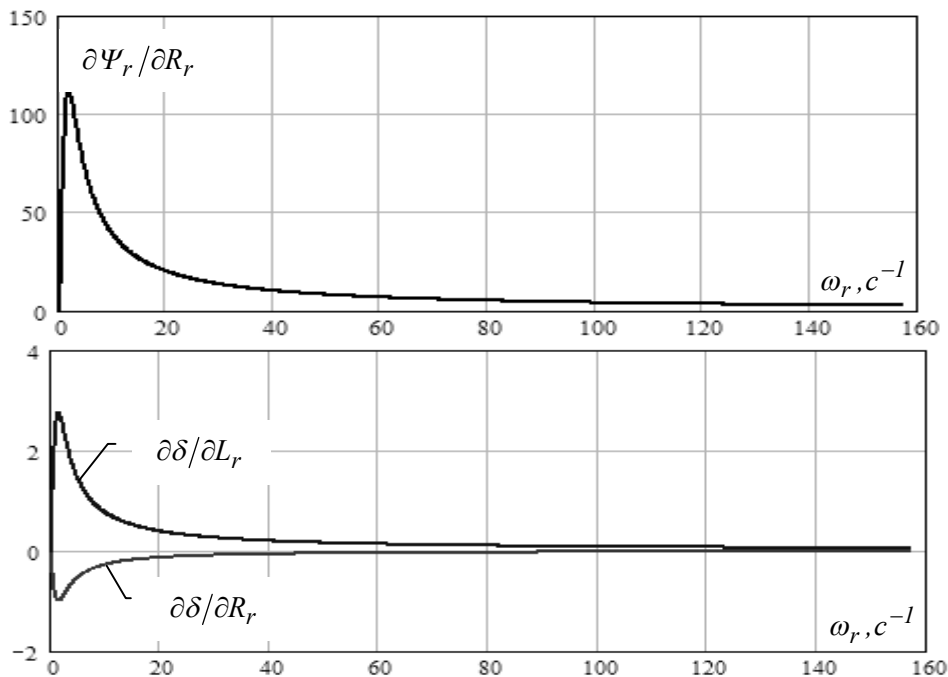


Рис. 2. Графіки функцій чутливості координат спостерігача к зміні параметрів асинхронної машини

Якщо значення похідних позитивні, то зміна координати відбувається в тім же напрямку, що і зміна параметрів, а якщо похідні негативні, то при зростанні параметра координата зменшується і навпаки. З порівняльного аналізу числових значень функцій чутливості випливає, що найбільшу чутливість модуль потокозчеплення ротора Ψ_r має до зміни активного опору ротора R_r . Потокозчеплення Ψ_r практично не залежить від повної індуктивності ротора L_r , тому що відповідна функція чутливості має найменше за модулем значення з усіх чотирьох фу-

нкцій. Кут повороту вектора потокозчеплення ротора відносно статора δ значно менше залежить від активного опору ротора R_r , чим модуль потокозчеплення Ψ_r , і напрямок цієї незначної зміни протилежний, на що вказує негативність похідної. На модуль потокозчеплення Ψ_r сильніше впливає параметр R_r , а на кут δ значніше впливає параметр L_r . У цілому за своєю величиною виразно виділяється одна похідна, а саме $\partial\Psi_r/\partial R_r$, у порівнянні з іншими похідними по параметрах. Це вказує на те, що на точність ідентифікації вектора потокозчеплення ротора головним чином впливає зміна активного опору ротора АМ у процесі її роботи.

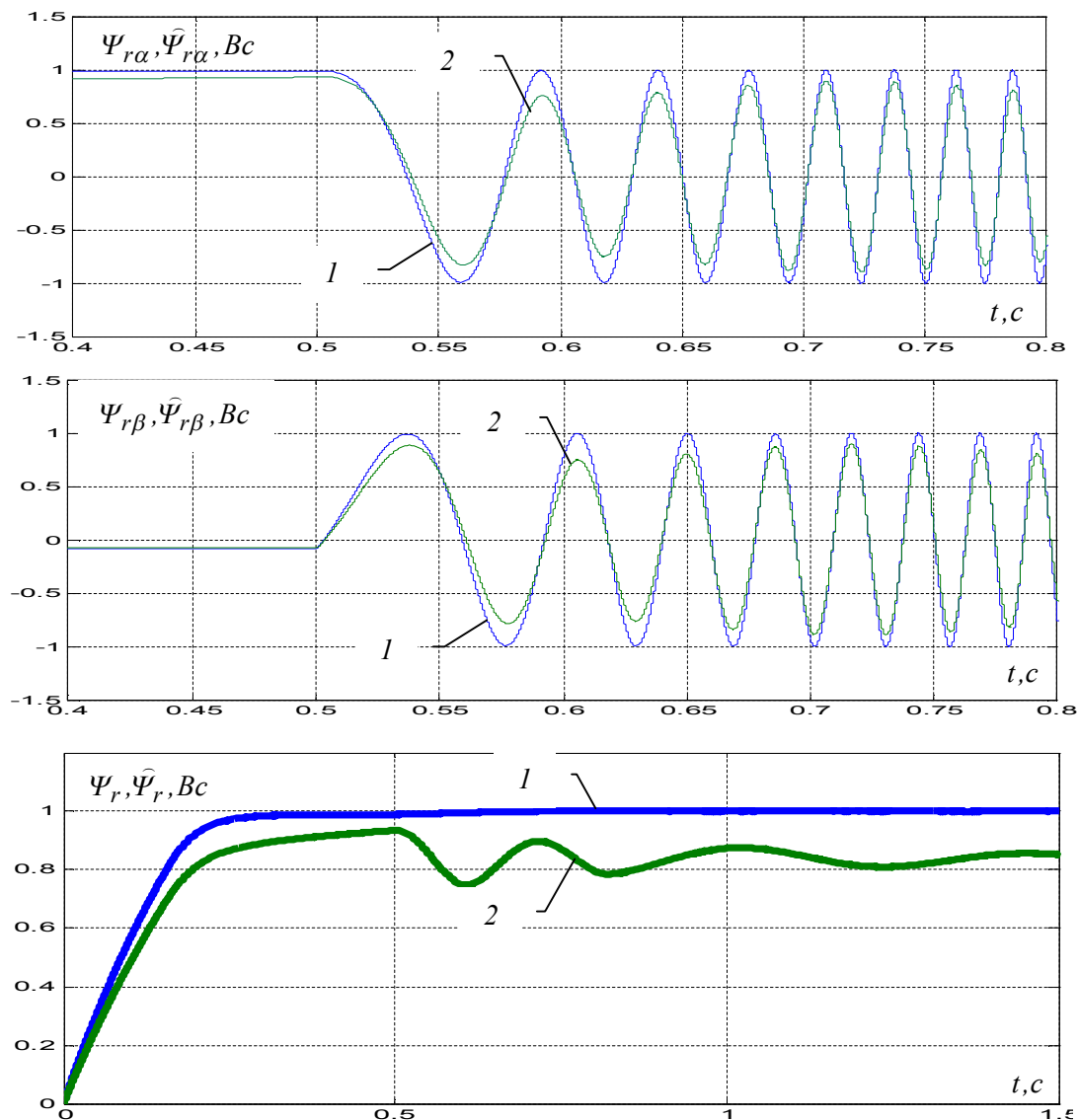


Рис. 3. Графіки проєкцій вектора потокозчеплення ротора, його модуль та ці величини визначені спостерігачем:
1 — оцінки потокозчеплень, обчислені спостерігачем;
2 — потокозчеплення ротора асинхронної машини

Досліджувалася динаміка спостерігача (13), зі структурною схемою на рис. 1. Графіки потокозчеплень представлені на рис. 3. Якщо параметри АМ і спостерігача однакові, то графіки на кожному полі рис. 3 збігаються. Однак унаслідок нагріву обмоток збільшується опір фаз ро-

тора на 10 %, а саме до зміни опору ротора найбільш чутливі координати спостерігача. Як видно з графіків, збільшення параметра R_r на 10 % призвело до помітного зменшення модуля потокозчеплення ротора. При цьому, як видно з графіків для проекцій $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$, фазового зрушення між справжніми значеннями потокозчеплень і їх оцінками, обчисленими спостерігачем, практично не існує, тобто на кут δ повороту вектора $\vec{\Psi}_r$ відносно статора зміна параметра R_r майже не впливає. Даний результат погодиться зі значеннями функцій чутливості, отриманими вище. Чутливість кута δ до зміни параметра R_r в $2,693/0,018 = 150$ разів менша, ніж чутливість модуля вектора $\vec{\Psi}_r$ до зміни цього ж параметра. З графіків на рис. 3 видно, що спостерігач (13) не володіє асимптотичною стійкістю.

Таким чином, побудований спостерігач (13) зі структурною схемою на рис. 1 без коригувальних зворотних зв'язків. Досліджено чутливість координат спостерігача $\hat{\Psi}_{r\alpha}$, $\hat{\Psi}_{r\beta}$ до зміни параметрів асинхронної машини. З'ясовано, що при збільшенні активного опору фаз ротора (що відбувається через нагрівання обмоток) істотно зменшується модуль потокозчеплення ротора Ψ_r , підвищується коливальність системи керування. Якщо в описаному випадку замкнути зворотний зв'язок за потокозчепленням ротора через спостерігач, векторна система керування, хоча і зі зменшенням якості регулювання, усе таки зберігає працездатність. При більшій в процентному відношенні зміні параметра R_r асинхронної машини, якість регулювання швидкості стає незадовільною. Тому спостерігач (13) можна використовувати тільки при невеликому діапазоні відхилень параметрів АМ від параметрів спостерігача — не більш 10 %. Якщо неузгодженість параметрів АМ і спостерігача (у першу чергу активний опір ротора) більше 10 %, то потрібні структурні засоби компенсації цих неузгодженостей, тобто потрібно застосовувати в спостерігачах коригувальні зворотні зв'язки, які додають спостерігачу асимптотичну стійкість при параметричних збуреннях.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У роботі отримані аналітичні вирази для сталих значень функцій чутливості координат такого нелінійного об'єкта як спостерігач потокозчеплення ротора до зміни параметрів АМ. Проведено порівняльний аналіз величин коефіцієнтів передачі між параметрами і координатами в системі асинхронна машина — спостерігач потокозчеплення ротора для різних його швидкостей обертання. Перехідні процеси, отримані в ході розв'язання рівнянь динаміки асинхронного ЕП зі спостерігачем потоку при одному фіксованому збільшенні опору роторних обмоток АМ доповнюють результати аналітичних розрахунків.

Список використаної літератури

1. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. М: Наука, 1981. 464 с.
2. Karl Johan Control System Design. – Department of Mechanical Environmental Engineering, University of California, 2002. 333 p.
3. Alonge, F., Cirrincione, M., Pucci, M. & Sferlazza, A. A. “Nonlinear observer for rotor flux estimation of induction motor considering the estimated magnetization characteristic”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. November-December 2017; Vol.53 Issue 6: p.5952–5965. DOI: 10.1109/TIA.2017.2710940.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Попович, О. Ю. Лозинський, Б. М. Мацко та ін.; За ред. М. Г. Поповича та О. Ю. Лозинського. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
5. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока/ «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново, 2008. 298 с.
6. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. Днепропетровск: НГУ, 2006. 470 с.
7. Holtz J. Sensorless control of induction motor drives // Proc. of the IEEE. 2002. V.90, № 8. P. 1359–1394.

8. Ишматов З.Ш., Волков М. А., Гурентьев Е.А. Анализ чувствительности робастных систем автоматического управления/XVI Научно-техническая конференция «Электроприводы переменного тока» - ЭППТ 2015, Екатеринбург. 2015. С. 95–98.
9. Delmotte E., Semail B., Robyns B. Flux observer for induction machine control//The European Physical Journal – Applied Physics, Vol. 14, Issue 1, 2003. P. 13–24.
10. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 335 с.
11. Пересада С.М. Метод синтеза инвариантных к вариациям активного сопротивления ротора алгоритмов прямого векторного управления асинхронным двигателем/ С.М. Пересада, В. Н. Трандафилов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. 2013. № 36 (1009). С. 59–63.
12. Solodkiy, E.M., Dadenkov, D.A., Kostygov, A.M. Sensorless vector control of asynchronous machine based on reduced order Kalman filter//Proceedings - 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018, P. 1–5 , DOI:10.1109/ACED.2018.8341710
13. Sferlazza A., Zaccarian L. Linear flux observers for induction motors with quadratic Lyapunov certificates//_25th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2016; Santa Clara Convention, United States; June 2016 . P. 167–172. DOI: 10.1109/ISIE.2016.7744884.
14. Pankratov, V.V., Vdovin, V.V., Sitnikov, G.G., Domanov, S.S. Globally stable adaptive observer for systems of general-purpose industrial asynchronous electric drives_Russian Electrical Engineering, Vol. 82, Issue 6. June 2011. P. 319–323, DOI: 10.3103/S1068371211060101.
15. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Системи керування асинхронними вентилями каскадами. – Кам'янське: ДДТУ, 2018. 294 с.
16. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

RESEARCH SENSITIVITY OF THE ROTOR FLUX LINKAGE OBSERVER TO CHANGE PARAMETERS OF THE ASYNCHRONOUS MACHINE

Klyuyev O., Sadovoi A., Sokhina Y.

Abstract

When changing the parameters of the control object to ensure the required quality of control, the tuning parameters of the control system must be changed. Investigation of the sensitivity of mathematical models helps to choose the right technical parameters of the regulators. Therefore, there is an urgent scientific task, which consists in the development of mathematical models for calculating the steady-state values of the sensitivity functions of the coordinates of non-linear systems to changes in their parameters.

When synthesizing observers of the rotor flux linkage, it is indicated that the signal for evaluating the rotor flux linkage is most sensitive to a change in the active resistance of the rotor of an induction machine. However, the numerical values of the transmission coefficients between the coordinates of the observer and the increments of the parameters of the asynchronous machine during its operation are not given, which does not allow a comparative analysis of the degree of influence of changes in certain parameters of the asynchronous machine on the signals of the observer of the flux linkage.

The task is to find and compare the numerical values of the functions of the sensitivity of the coordinates of the observer of the rotor flux linkage to the change in the parameters of the asynchronous machine by joint analytical solution of the static equations of the observer's sensitivity model and the state model of the asynchronous machine.

In this work, analytical expressions are obtained for the steady-state values of the sensitivity functions of the coordinates of such a nonlinear object as an observer of the rotor flux linkage to a change in the parameters of an asynchronous machine. A comparative analysis of the values of the

transmission coefficients between the parameters and coordinates in the system asynchronous machine — observer of the rotor flux linkage for its various rotation speeds is carried out. The proposed technique makes it possible to find the numerical values of the transmission coefficients and to compare the degree of influence of various parameters of the asynchronous machine on the coordinates of the flux linkage observer. Transient processes obtained in the course of solving the equations of the dynamics of an asynchronous electric drive with an observer of flux linkage complement the results of analytical calculations. The performed calculations are aimed at increasing the depth of analysis of the properties of the flux link observer, which helps to reasonably choose the structure of feedbacks when synthesizing a closed observer.

References

- [1] Rozenvasser E.N. & Yusupov R.M. (1981) *Chuvstvitelnost sistem upravleniya*. – M: Nauka, 1981. 464 p. [in Russian].
- [2] Karl Johan *Control System Design*. – Department of Mechanical Environmental Engineering, University of California, 2002. p.333.
- [3] Alonge F. & Cirrincione M. & Pucci M. & Sferlazza A. (2017) «*Nonlinear observer for rotor flux estimation of induction motor considering the estimated magnetization characteristic*». *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol.53. Issue 6: P. 5952–5965. DOI: 10.1109/TIA.2017.2710940.
- [4] Popovych M.H. & Lozynskiy O. Yu. & Matsko B. M. (2005) *Elektromekhanichni systemy avtomatichnoho keruvannia ta elektropryvody* / Za red. M. H. Popovycha ta O. Yu. Lozynskoho. Kyiv : Lybid. 680 p. [in Ukraine].
- [5] Vinogradov A.B. [2008] *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* «Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet». Ivanovo. 298 p. [in Russian].
- [6] Pivnyak G.G. & Volkov A.V. (2006) *Sovremennye chastotno-reguliruemye asinhronnye elektropryvody s shirotno-impul'snoju modulyacieju*. Dnepropetrovsk: NGU. 470 p. [in Russian].
- [7] Holtz J. (2002) *Sensorless control of induction motor drives*// Proc. of the IEEE.Vol.90. № 8. P. 1359–1394.
- [8] Ishmatov Z.Sh. & Volkov M. A. & Gurentev E.A.(2015) *Analiz chuvstvitelnosti robnastnyh sistem avtomaticheskogo upravleniya/XVI Nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Elektropryvody peremennogo toka»* - EPPT 2015, Ekaterinburg. P. 95–98. [in Russian].
- [9] Delmotte E. & Semail B. & Robyns B. (2003) *Flux observer for induction machine control*//The European Physical Journal – Applied Physics, Vol. 14, Issue 1. P. 13–24.
- [10] Norenkov I.P. (2002) *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya*. – M: Izd. MGTU im. N.E. Bauman. 335 p. [in Russian].
- [11] Peresada S.M. & Trandafilov V. N. (2013) *Metod sinteza invariantnyh k variacijam aktivnogo soprotivleniya rotora algoritmov pryamogo vektornogo upravleniya asinhronnym dvigatelem*// Visnik Nacionalnogo tekhnichnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac. Seriya: problemu avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika . № 36 (1009). P. 59–63. [in Russian].
- [12] Solodkiy E.M. & Dadenkov D.A. & Kostygov A.M. (2018) *Sensorless vector control of asynchronous machine based on reduced order Kalman filter*//Proceedings -17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018, pp. 1-5, DOI:10.1109/ACED.2018.8341710.
- [13] Sferlazza A. & Zaccarian L. (2016) *Linear flux observers for induction motors with quadratic Lyapunov certificates*//_25th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2016; Santa Clara Convention, United States; P. 167–172, DOI: 10.1109/ISIE.2016.7744884.
- [14] Pankratov, V.V. & Vdovin, V.V. & Sitnikov, G.G.& Domanov, S.S. (2011) *Globally stable adaptive observer for systems of general-purpose industrial asynchronous electric drives* \\ Russian Electrical Engineering, Volume 82, Issue 6. P. 319–323. DOI: 10.3103/S1068371211060101.
- [15] Kliuiev O.V. & Sadovoi O.V. & Sokhina Yu.V. (2018) *Systemy keruvannia asynkhronnymy ventylnymy kaskadamy*. – Kamianske: DDTU. 294 p. [in Ukraine].
- [16] Kravchik A.E. & Shlaf M.M. & Afonin V.I. (1982) *Asinhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik* M.: Energoizdat 504 p. [in Russian].