

О. В. КЛЮЄВ

кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки  
Дніпровський державний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-4542-3317

О. В. САДОВОЙ

доктор технічних наук, професор  
Дніпровський державний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-9739-3661

Ю. В. СОХІНА

кандидат технічних наук, доцент  
Дніпровський державний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-4329-5182

## СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧА ШВИДКОСТІ РОТОРА МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

*Передумовою досліджень, проведених у цій статті, став той факт, що спостерігачі кутової швидкості ротора асинхронних машин, як правило, будуються на основі розімкнених спостерігачів потокозчеплення. Для машин подвійного живлення (МПЖ) вихідними для синтезу обрано рівняння електромагнітних процесів асинхронної машини, записані в ортогональних осях, зв'язаних із ротором. Змінними стану спостерігача є проекції векторів струму ротора та потокозчеплення статора на осі  $d$ ,  $q$ . На основі цих змінних та їх порівняння з фактичними струмами ротора формується функція адаптації, інтеграл від якої є оцінкою швидкості ротора МПЖ. Під час виведення алгоритму адаптації спостерігача з'являється квадратична форма, матриця якої складається із суми матриці стану та результату її транспонування. Однак результуюча матриця не належить до від'ємно визначених. Тому в роботі для надання спостерігачу потокозчеплення та швидкості властивості глобальної стійкості у рівняння електромагнітних процесів вводяться коригувальні зв'язки за неузгодженостями струмів таким чином, щоб обнулити коефіцієнти матриці квадратичної форми, які не належать головній діагоналі, а сама матриця стає від'ємно визначеною. Це забезпечує спостерігачу потокозчеплення стійкість у цілому. Надалі до нього добудовується функція адаптації як векторний добуток векторів потокозчеплення статора та помилки визначення струму ротора з внутрішнім регулятором, на виході якого отримуємо сигнал оцінки кутової швидкості МПЖ. Таким чином, структура спостерігача складається з підсистеми електромагнітних процесів, підсистеми коригувальних зв'язків та елементів структури, що формують оцінку швидкості. Отриманий спостерігач є замкненим, оскільки всі його змінні стану обчислюються в результаті розв'язання його власних рівнянь динаміки. Вхідними змінними слугують лише напруги статора і ротора, а також струми ротора. Спостерігач формує динамічну петлю зворотного зв'язку для векторної системи керування МПЖ. Стійкість такої системи перевірена чисельним експериментом у режимах підключеного до мережі статора та його закорочення, а також у режимі рекуперативного гальмування при швидкості нижче синхронної.*

**Ключові слова:** Машина подвійного живлення; знаковизначена матриця; структурний синтез; спостерігач потоку і швидкості; функція адаптації; стійкість у цілому.

O. V. KLIUIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics  
Dniprovsk State Technical University  
ORCID: 0000-0003-4542-3317

O. V. SADOVOI

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Dniprovsk State Technical University  
ORCID: 0000-0001-9739-3661



YU. V. SOKHINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Dniprovsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-4329-5182

## STRUCTURAL SYNTHESIS OF A ROTOR SPEED OBSERVER FOR A DOUBLY FED MACHINE

*The prerequisite for the studies presented in this paper is the fact that observers of the rotor angular speed of induction machines are, as a rule, constructed on the basis of open loop flux linkage observers. For doubly fed machines (DFM) the equations of electromagnetic processes of the induction machine, written in orthogonal axes attached to the rotor, are taken as the basis for synthesis. The state variables of the observer are the  $d$ - $q$  projections of the rotor current vectors and the stator flux linkage vectors. From these variables and their comparison with the actual rotor currents an adaptation function is formed, the integral of which represents an estimate of the rotor speed of the DFM. During the derivation of the observer adaptation algorithm, a quadratic form arises whose matrix consists of the sum of the state matrix and its transpose. However the resulting matrix is not negative definite. Therefore in order to impart the property of global stability to the flux linkage and speed observer, corrective feedbacks based on current mismatch signals are introduced into the equations of electromagnetic processes in such a way that the off-diagonal coefficients of the quadratic form matrix are eliminated, and the matrix itself becomes negative definite. This ensures global stability of the flux linkage observer. Subsequently an adaptation function is added to it in the form of the vector product of the stator flux linkage vector and the rotor current estimation error vector, with an internal controller, at the output of which a signal estimating the angular speed of the DFM is obtained. Thus the observer structure consists of an electromagnetic process subsystem, a corrective feedback subsystem and structural elements that form the speed estimate. The resulting observer is closed-loop since all its state variables are obtained as a result of solving its own dynamic equations. The input variables are only the stator and rotor voltages as well as the rotor currents. The observer forms a dynamic feedback loop for the vector control system of the DFM. The stability of such a system is verified by numerical experiments under operating conditions with the stator connected to the grid and with the stator short-circuited, in the regenerative braking mode at speeds below synchronous.*

**Key words:** doubly fed machine; sign-definite matrix; structural synthesis; flux and speed observer; adaptation function; global stability.

### Постановка проблеми

У статті [1] запропоновано методику синтезу спостерігача швидкості ротора МПЖ на основі ідентифікатора потокозчеплення статора без коригувальних зв'язків. Спостерігач швидкості синтезований у класі систем з еталонною моделлю (так звані системи MRAS – Model Reference Adaptive System). Алгоритм адаптації в спостерігачі швидкості представляє інтеграл від векторного добутку векторів потокозчеплення статора і помилки визначення вектора струму ротора. У процедурі синтезу спостерігача на основі другого методу О. М. Ляпунова матриця квадратичної форми електромагнітних змінних МПЖ формується на підставі матриці стану МПЖ. Матриця, яку отримують при цьому, не відповідає умовам негативної визначеності квадратичної форми. Якщо цим знехтувати, як зроблено в статті [1], то спостерігач швидкості ротора МПЖ залишається стійким, але не в усіх режимах роботи. При рекуперативному гальмуванні при швидкостях нижче синхронної алгоритм ідентифікації швидкості може втрачати асимптотичну стійкість, починаються автоколивання кутової швидкості ротора і система керування втрачає працездатність. Тому процедурі синтезу спостерігача швидкості ротора МПЖ потрібно додати більшу строгість, що складається в забезпеченні негативної визначеності квадратичної форми електромагнітних змінних МПЖ за рахунок введення до складу матриці цієї квадратичної форми коригувальних зворотних зв'язків. На підставі аналізу літературних джерел виявимо, які типи структур MRAS спостерігачів використовуються в системах векторного бездатчикового керування МПЖ.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [2] представлений аналіз спостерігача на базі адаптивної системи з еталонною моделлю (MRAS) для бездатчикового керування автономним генератором подвійного живлення. Структуру спостерігача визначає вигляд функції адаптації, яка вважається на даний момент вже стандартною і являє собою векторний добуток оцінок вектора потокозчеплення статора через еталонну модель напруги статора й адаптивну струмову модель ротора. Подальші дослідження такого спостерігача швидкості підтвердили його придатність не тільки для автономного генератора, а й в інших застосуваннях МПЖ. У [3] замість ПІ-регулятора використовується алгоритм ковзного режиму, коли помилка оцінювання, як різниця сигналів еталонної й адаптивної моделей, прямує до нуля при влученні на поверхню ковзання. У [4] для традиційного векторного керування реалізований адаптивний спостерігач вектора потокозчеплення статора з визначенням положення ротора на основі обмірюваних фазних струмів статора і ротора. Через неточність параметрів оцінка положення ротора супроводжується помилкою, що розглядається як додатковий параметр машини і пропонується процедура компенсації цієї помилки алгоритмом, синтезованим на основі теорії стійкості Ляпунова. У статті [5] спостерігач швидкості МПЖ із такою ж структурою досліджується в умовах симетричних і несиметричних провалів напруги статора. У [6] викладений

алгоритм бездатчикового керування швидкістю синхронним двигуном з постійними магнітами. Вимірюється тільки струм у ланці постійного струму транзисторного інвертора, що живить статорні обмотки синхронного двигуна. Адаптивний алгоритм використовує тільки моментоутворюючу складову струму статора по осі  $q$ , оскільки проекція на вісь  $d$  у всіх режимах утримується рівною нулю. У більшості MRAS порівнюються струми або потокозчеплення. У статті [7] за основу узят активна потужність, що в еталонній моделі обчислюється через струми і напруги статора, а в адаптивній моделі активна потужність обчислюється через параметри ротора, у які входить і швидкість ротора. Замість ПІ-регулятора у функції адаптації використовується гістерезисне реле, на вхід якого подається різниця обмірюваної й оціненої активної потужності пропорційної швидкості ротора. Реле стійко працює в ковзному режимі, коли різниця обмірюваної й обчисленої активних потужностей на вході реле знаходиться в малій околиці нуля. У спостерегачах MRAS ПІ-регулятор може розгойдувати систему керування, якщо параметри МПЖ починають відрізнятися від параметрів спостерегача. Як відомо, помилка між еталонною й адаптивною моделями використовується алгоритмом адаптації. У [8] класичний ПІ-регулятор у функції адаптації замінюється  $H_\infty$  – контролером, щоб підвищити робастність спостерегача, коли зберігається не тільки стійкість, але і задовільна якість спостереження за швидкістю при найгірших можливих параметричних збуреннях у системі керування.

**Формулювання мети дослідження**

Огляд літературних джерел показує, що пошуки нових структур MRAS спостерегачів для МПЖ проводяться в напрямках розроблення нових функцій адаптації як різних комбінацій векторів у складі їх векторного добутку або застосування різних типів регуляторів від похибки нев’язання, що розраховується відповідним чином. Завдання статті полягає в дослідженні динаміки МПЖ із векторною системою керування, до складу якої входить спостерегач швидкості ротора з відомою функцією адаптації, реалізованою за вектором потокозчеплення статора, але зі структурними змінами, зумовленими введенням коригувальних зв’язків у рівняння електромагнітних змінних спостерегача швидкості.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Система рівнянь електромагнітних контурів МПЖ наступна [1]:

$$\begin{aligned}
 pI_{rd} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rd} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sd} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \Psi_{sq} + \frac{L_s u_{rd} - L_m u_{sd}}{L_s L_r - L_m^2}, \\
 pI_{rq} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rq} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sq} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \Psi_{sd} + \frac{L_s u_{rq} - L_m u_{sq}}{L_s L_r - L_m^2}, \\
 p\Psi_{sd} &= -\frac{R_s}{L_s} \Psi_{sd} + k_s R_s I_{rd} + \omega \Psi_{sq} + u_{sd}; \\
 p\Psi_{sq} &= -\frac{R_s}{L_s} \Psi_{sq} + k_s R_s I_{rq} - \omega \Psi_{sd} + u_{sq}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Рівняння електромагнітних контурів МПЖ (1) у матричній формі мають вигляд

$$p \begin{pmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & -a_{14}\omega \\ 0 & -a_{22} & a_{23}\omega & a_{24} \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & \omega \\ 0 & a_{42} & -\omega & -a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & -b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & -b_{24} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

де

$$\begin{aligned}
 a_{11} = a_{22} &= \frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2}; & a_{13} = a_{24} &= \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2}; & a_{14} = a_{23} &= \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2}; \\
 a_{31} = a_{42} &= k_s R_s; & a_{33} = a_{44} &= \frac{R_s}{L_s}; & b_{11} = b_{22} &= \frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2}; \\
 b_{13} = b_{24} &= \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2}; & b_{33} = b_{44} &= 1.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Рівняння (2) можна записати так:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU, \tag{4}$$

де  $X = (I_{rd} \ I_{rq} \ \Psi_{sd} \ \Psi_{sq})^T$ ;  $U = (u_{rd} \ u_{rq} \ u_{sd} \ u_{sq})^T$ ;

$$A = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & -a_{14}\omega \\ 0 & -a_{22} & a_{23}\omega & a_{24} \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & \omega \\ 0 & a_{42} & -\omega & -a_{44} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & -b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & -b_{24} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

У матриці стану  $A$  можуть діяти параметричні збурення і координатне збурення за швидкістю  $\omega$ . Тому для забезпечення стійкості спостерігача його доцільно синтезувати разом з матрицею коригувальних коефіцієнтів за відхиленнями струмів. Запишемо рівняння спостерігача в наступному вигляді

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = \hat{A}\hat{X} + BU + G(\hat{I}_r - I_r) = \hat{A}\hat{X} + BU + GC(\hat{X} - X), \quad (6)$$

де  $G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \\ g_{41} & g_{42} \end{pmatrix}$  – матриця коефіцієнтів зворотних зв’язків за струмами;  $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  – матриця зіставлення

змінних стану з тими змінними, за якими замикаються зворотні зв’язки;  $I_r = (I_{rd} \ I_{rq})^T$ ,  $\hat{I}_r = (\hat{I}_{rd} \ \hat{I}_{rq})^T$  – вектори-стовпці проєкцій вектора струму ротора на осі d,q та їх оцінок;  $\hat{X} = (\hat{I}_{rd} - I_{rd} \ \hat{I}_{rq} - I_{rq} \ \hat{\Psi}_{sd} - \Psi_{sd} \ \hat{\Psi}_{sq} - \Psi_{sq})^T$  – вектор-стовпець відхилень оцінок змінних стану МПЖ від їх справжніх значень.

Помилка оцінювання змінних стану представляє рівняння збуреного руху спостерігача

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{X}}{dt} - \frac{dX}{dt} &= \frac{de}{dt} = \hat{A}\hat{X} + BU + GC(\hat{X} - X) - AX - BU = (A + \Delta A)\hat{X} - AX + GC(\hat{X} - X) = \\ &= A(\hat{X} - X) + \Delta A\hat{X} + GC(\hat{X} - X) = Ae + GCe + \Delta A\hat{X} = (A + GC)e + \Delta A\hat{X}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $e = \hat{X} - X$  – вектор відхилень обчислених змінних від їх фактичних значень.

Якщо покласти, що матриця прирощень  $\Delta A$  обумовлена тільки відхиленнями обчислених спостерігачем значень швидкості від їх обмірюваних значень, то можна записати

$$\Delta A = \hat{A} - A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_{14}\Delta\omega \\ 0 & 0 & a_{23}\Delta\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta\omega \\ 0 & 0 & -\Delta\omega & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де  $\Delta\omega = \hat{\omega} - \omega$ ;  $\omega, \hat{\omega}$  – кутова швидкість ротора та її оцінка, визначена спостерігачем.

Введемо наступну позитивно визначену квадратичну форму

$$V = e^T e + \frac{\Delta\omega^2}{\lambda} = \Delta I_{rd}^2 + \Delta I_{rq}^2 + \Delta \Psi_{sd}^2 + \Delta \Psi_{sq}^2 + \frac{\Delta\omega^2}{\lambda} > 0, \quad \lambda > 0. \quad (9)$$

Подальші викладення будемо проводити виходячи з того, що вираз (9) є функцією Ляпунова для спостерігача (6).

Знаходимо повну похідну за часом від функції (9) на траєкторіях збуреного руху спостерігача (7):

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{de^T}{dt}\right)e + e^T \left(\frac{de}{dt}\right) + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \left(\frac{de^T}{dt}\right)e + e^T \left(\frac{de}{dt}\right) + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\Delta\omega}{dt}. \quad (10)$$

З перетворень (7) випливає

$$\frac{de}{dt} = (A + GC)e + \Delta A\hat{X} \Rightarrow \frac{de^T}{dt} = e^T (A + GC)^T + (\Delta A\hat{X})^T. \quad (11)$$

Підставимо (11) у (10) і приймемо, що швидкість ротора змінюється істотно повільніше, ніж її оцінка:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e^T (A + GC)^T e + (\Delta A\hat{X})^T e + e^T (A + GC)e + e^T (\Delta A\hat{X}) + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \\ &= e^T [(A + GC)^T + (A + GC)] e + 2e^T \Delta A\hat{X} + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt}. \end{aligned} \quad (12)$$

У (12) є доданки, для яких виконується умова

$$\begin{aligned}
 (\Delta A \hat{X})^T e = e^T (\Delta A \hat{X}) = & \begin{pmatrix} \Delta I_{rd} & \Delta I_{rq} & \Delta \Psi_{sd} & \Delta \Psi_{sq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_{14} \Delta \omega \\ 0 & 0 & a_{23} \Delta \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \omega \\ 0 & 0 & -\Delta \omega & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \\ \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{pmatrix} = \\
 = & -a_{14} \hat{\Psi}_{sq} \Delta I_{rd} \Delta \omega + a_{23} \hat{\Psi}_{sd} \Delta I_{rq} \Delta \omega + \hat{\Psi}_{sq} \Delta \Psi_{sd} \Delta \omega - \hat{\Psi}_{sd} \Delta \Psi_{sq} \Delta \omega.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Розіб'ємо вираз (12) на два доданки

$$\frac{dV}{dt} = S_1 + S_2, \tag{14}$$

де  $S_1 = e^T [(A + GC)^T + (A + GC)] e$ ;  $S_2 = 2e^T \Delta A \hat{X} + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt}$ .

Для стійкості спостерігача (6) функція (14) повинна бути негативно визначеною, що буде виконуватися, якщо забезпечити негативну визначеність квадратичної форми  $S_1$ , а вираз  $S_2$  дорівнювати нулю.

Якщо прийняти  $S_1$  рівним нулю, то з урахуванням виразу (13) одержимо наступне рівняння

$$S_2 = 2e^T \Delta A \hat{X} + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} = 2\Delta \omega \left( -a_{14} \hat{\Psi}_{sq} \Delta I_{rd} + a_{23} \hat{\Psi}_{sd} \Delta I_{rq} + \hat{\Psi}_{sq} \Delta \Psi_{sd} - \hat{\Psi}_{sd} \Delta \Psi_{sq} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} \right) = 0. \tag{15}$$

Вирази в дужках дорівнюємо нулю і розв'язанням отриманого рівняння знаходимо алгоритм ідентифікації швидкості

$$\hat{\omega} = \lambda \int \left[ a_{14} \hat{\Psi}_{sq} (\hat{I}_{rd} - I_{rd}) - a_{23} \hat{\Psi}_{sd} (\hat{I}_{rq} - I_{rq}) + \hat{\Psi}_{sd} (\hat{\Psi}_{sq} - \Psi_{sq}) - \hat{\Psi}_{sq} (\hat{\Psi}_{sd} - \Psi_{sd}) \right] dt, \tag{16}$$

який з урахуванням співвідношення  $a_{14} = a_{23}$ , може бути записаний інакше

$$\hat{\omega} = -\lambda a_{23} \int \begin{vmatrix} \hat{\Psi}_{sd} & \hat{\Psi}_{sq} \\ \Delta I_{rd} & \Delta I_{rq} \end{vmatrix} dt + \lambda \int \begin{vmatrix} \hat{\Psi}_{sd} & \hat{\Psi}_{sq} \\ \Delta \Psi_{sd} & \Delta \Psi_{sq} \end{vmatrix} dt = -\lambda a_{23} \int [\hat{\Psi}_s \times \Delta I_r] dt + \lambda \int [\hat{\Psi}_s \times \Delta \Psi_s] dt. \tag{17}$$

З формули (17) випливає, що алгоритм ідентифікації швидкості складається із суми інтегралів від векторних добутків вектора оцінки поточозчеплення статора на вектори відхилень оцінок струму ротора і поточозчеплення статора від їх фактичних значень.

Для стійкої роботи алгоритму (17) одночасно з ним повинна бути забезпечена негативна визначеність квадратичної форми  $S_1$ . При заміні кутової швидкості ротора  $\omega$  її оцінкою  $\hat{\omega}$  і з урахуванням виразу (3), матриця квадратичної форми  $S_1$  приймає вигляд

$$\begin{aligned}
 K = (A + GC)^T + (A + GC) = \\
 = \begin{pmatrix} -2a_{11} + 2g_{11} & g_{12} + g_{21} & a_{13} + a_{31} + g_{31} & -a_{23} \hat{\omega} + g_{41} \\ g_{21} + g_{12} & -2a_{11} + 2g_{22} & a_{23} \hat{\omega} + g_{32} & a_{13} + a_{31} + g_{42} \\ a_{31} + a_{13} + g_{31} & a_{23} \hat{\omega} + g_{32} & -2a_{33} & 0 \\ -a_{23} \hat{\omega} + g_{41} & a_{31} + a_{13} + g_{42} & 0 & -2a_{33} \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Якщо матрицю  $K$  зробити діагональною, то вона буде відповідати умовам Сильвестра негативної визначеності квадратичної форми  $S_1$ . У силу симетричності вихідної матриці  $K$  коригувальних коефіцієнтів  $g_{ij}$  достатньо, щоб зробити її діагональною. Виходячи з цієї умови, потрібно покласти рівними нулю коефіцієнти в рівняннях струмів

$$g_{11} = g_{22} = g_{12} = g_{21} = 0. \tag{19}$$

Властивість діагональності матриці (18) буде забезпечено при виконанні наступних умов:

$$K_{13} = K_{31} = a_{13} + a_{31} + g_{31} = 0; \tag{20}$$

$$K_{24} = K_{42} = a_{13} + a_{31} + g_{42} = 0; \tag{21}$$

$$K_{23} = K_{32} = a_{23} \hat{\omega} + g_{32} = 0; \tag{22}$$

$$K_{14} = K_{41} = -a_{23} \hat{\omega} + g_{41} = 0. \tag{23}$$

З рівностей (20) і (21) випливає

$$g_{31} = g_{42} = -a_{13} - a_{31}. \tag{24}$$

З умов (22) і (23) буде

$$g_{41} = -g_{32} = a_{23}\hat{\omega}. \quad (25)$$

Система рівнянь (6), розв'язувана в реальному часі, є спостерігачем вектора потокозчеплення статора, у який вводяться коригувальні зв'язки за неузгодженостями струмів для додання спостерігачу стійкості при дії в ньому або в МПЖ параметричних збурень. Запишемо рівняння спостерігача (6) у скалярній формі з урахуванням формул (24), (25) і матриць (5) за умови, що замість значення швидкості ротора в матриці стану  $A$  використовується оцінка кутової швидкості ротора МПЖ із додаванням у систему рівнянь алгоритму ідентифікації швидкості (16):

$$\begin{aligned} p\hat{I}_{rd} &= -a_{11}\hat{I}_{rd} + a_{13}\hat{\Psi}_{sd} - a_{14}\hat{\omega}\hat{\Psi}_{sq} + b_{11}u_{rd} - b_{13}u_{sd}; \\ p\hat{I}_{rq} &= -a_{22}\hat{I}_{rq} + a_{24}\hat{\Psi}_{sq} + a_{23}\hat{\omega}\hat{\Psi}_{sd} + b_{22}u_{rq} - b_{24}u_{sq}; \\ p\hat{\Psi}_{sd} &= a_{31}\hat{I}_{rd} - a_{33}\hat{\Psi}_{sd} + \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sq} + (a_{13} + a_{31})(I_{rd} - \hat{I}_{rd}) + a_{23}\hat{\omega}(I_{rq} - \hat{I}_{rq}) + b_{33}u_{sd}; \\ p\hat{\Psi}_{sq} &= a_{42}\hat{I}_{rq} - a_{44}\hat{\Psi}_{sq} - \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sd} - a_{23}\hat{\omega}(I_{rd} - \hat{I}_{rd}) + (a_{13} + a_{31})(I_{rq} - \hat{I}_{rq}) + b_{44}u_{sq}. \\ \hat{\omega} &= \lambda \int [a_{23}\hat{\Psi}_{sd}(I_{rq} - \hat{I}_{rq}) - a_{14}\hat{\Psi}_{sq}(I_{rd} - \hat{I}_{rd}) + \hat{\Psi}_{sd}(\hat{\Psi}_{sq} - \Psi_{sq}) - \hat{\Psi}_{sq}(\hat{\Psi}_{sd} - \Psi_{sd})] dt. \end{aligned} \quad (26)$$

Спостерігач (26) опорного вектора потокозчеплення статора і кутової швидкості ротора можна використовувати у векторних системах керування МПЖ із релейними регуляторами, синтезованими в базисі перших похідних. У такій системі керування релейний регулятор кутової швидкості ротора МПЖ використовує жорсткий зворотний зв'язок за оцінкою кутової швидкості і зворотний зв'язок за першою похідною від оцінки кутової швидкості.

Другий доданок в алгоритмі ідентифікації (17), що містить векторний добуток векторів оцінки вектора потокозчеплення статора і помилки ідентифікації потокозчеплення статора, потребує виміру проекцій вектора потокозчеплення статора  $\Psi_{sd}, \Psi_{sq}$ , що представляє складну технічну задачу і ставить під сумнів доцільність розв'язання самої задачі синтезу спостерігача. Тому перевірялася можливість зневаги другим доданком в алгоритмі (17) з метою доказу достатності урахування векторного добутку векторів за неузгодженістю струмів як легко вимірюваних величин, для коректної ідентифікації кутової швидкості ротора МПЖ. Також для підвищення швидкодії спостерігача додається пропорційна складова від функції адаптації. Таким чином, методом математичного моделювання перевірялася працездатність спостерігача (26) з алгоритмом ідентифікації швидкості, який має вигляд

$$\hat{\omega} = \left( \tau + \frac{\lambda}{p} \right) \left[ \hat{\Psi}_{sd}(I_{rq} - \hat{I}_{rq}) - \hat{\Psi}_{sq}(I_{rd} - \hat{I}_{rd}) \right], \quad (27)$$

у якому унаслідок того, що  $a_{14} = a_{23}$ , зазначені коефіцієнти винесені з під операції інтегрування і включені до складу параметра  $\lambda$ .

Структурна схема спостерігача кутової швидкості ротора МПЖ, побудована за рівняннями (26), (27), представлена на рис. 1. Спостерігач п'ятого порядку сполучає в собі ідентифікацію вектора потокозчеплення статора і швидкості ротора. Спостерігач побудований на основі рівнянь електромагнітних процесів у МПЖ, записаних в ортогональних осях координат  $d, q$ . Вхідними вимірюваними величинами є проекції векторів напруг статора і ротора, а також проекції вектора струму ротора на осі  $d, q$ . Структура, що відображає електромагнітні процеси, доповнюється коригувальними зв'язками за неузгодженостями оцінювання струмів і підсистемою обчислення оцінки кутової швидкості ротора. Для потреб векторного керування спостерігач визначає оцінки проекцій опорного вектора потокозчеплення статора  $\hat{\Psi}_{sd}, \hat{\Psi}_{sq}$ , що надходять далі у векторний аналізатор, і оцінку швидкості ротора для замикання за нею та її похідною негативних зворотних зв'язків у складі функції переключення релейного регулятора кутової швидкості ротора МПЖ.

У системі векторного керування МПЖ регулювання проводилося за двома каналами керування: реактивної потужності зі стабілізацією струму намагнічування й активної потужності з зовнішнім релейним регулятором швидкості і підпорядкованим йому регулятором активної складової струму ротора. Струм намагнічування утримується на постійному рівні, при якому коефіцієнт потужності статорного кола дорівнює одиниці. Динаміка електроприводу досліджувалася за допомогою програми написаної в математичному середовищі Matlab, у якій за вихідні бралися технічні дані АМ з фазним ротором:  $P_n = 11$  кВт,  $U_{sd} = 380$  В,  $n_c = 1500$  об/хв. У колі зворотного зв'язку системи керування включений спостерігач потокозчеплення і швидкості, динаміка якого описується системою рівнянь (26), (27) і структурною схемою на рис. 1. Перехідні процеси змінних, що характеризують роботу спостерігача, показані на рис. 2. Спершу статорні обмотки закорочені з живленням ротора від перетворювача частоти, завдання на швидкість дорівнює нулю, а струм намагнічування утримується на рівні, при якому потокозчеплення статора аперіодично зростає до номінального значення. Далі в 0.15 с у каналі активної потужності дається завдання на швидкість, що дорівнює 90 % синхронної швидкості. Починається пуск МПЖ із виходом швидкості на рівень завдання за допомогою релейного регулятора, у якого у функції переключення використовуються негативні

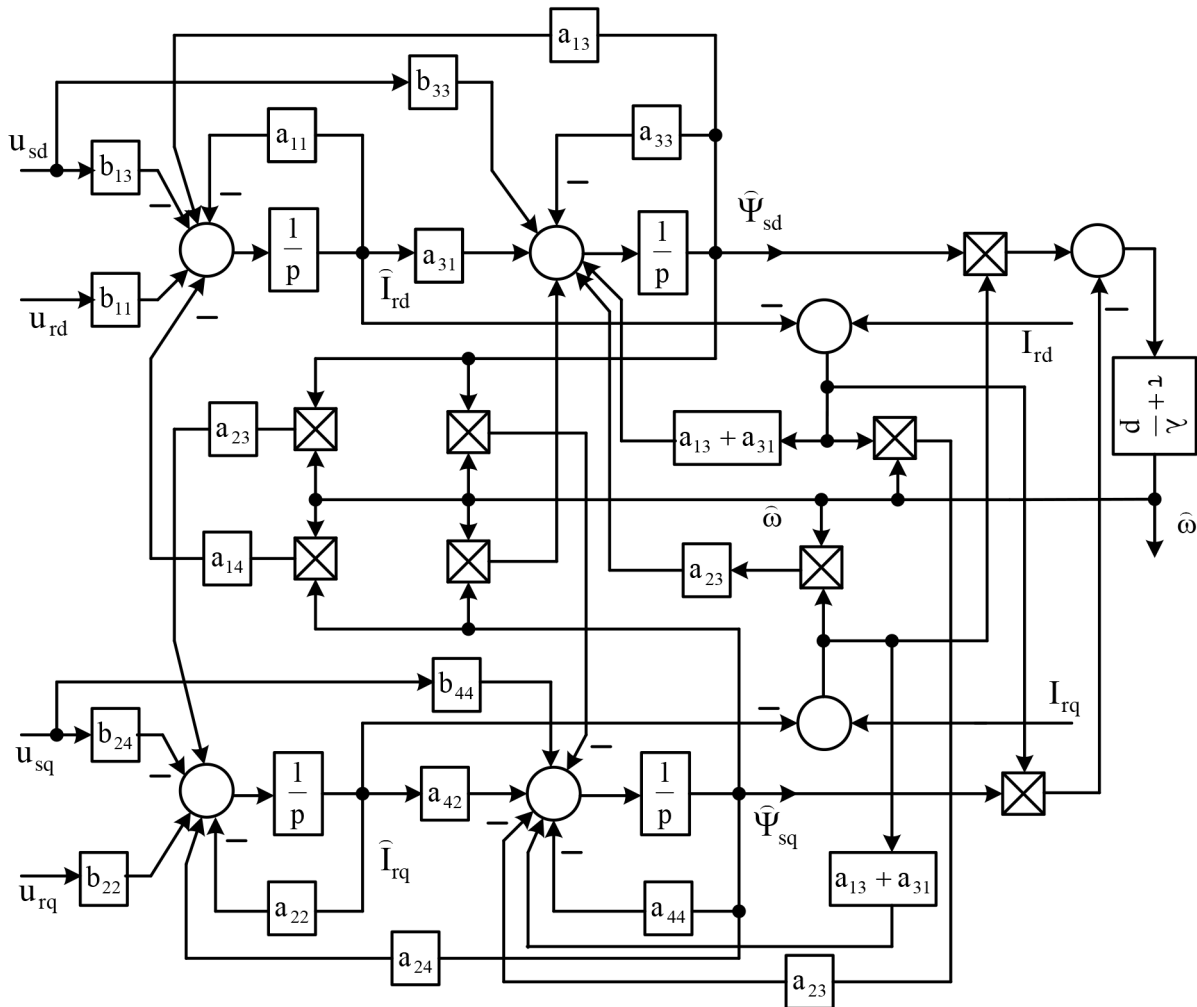


Рис. 1. Структурна схема спостерігача швидкості ротора МПЖ

зворотні зв'язки за оцінкою швидкості та її першою похідною з виходу спостерігача. Після того як пуск закінчився і швидкість стабілізована на рівні завдання, статор МПЖ у 0.45 с підключається до мережі, що супроводжується швидко гаснучими коливаннями модуля вектора потокозчеплення статора. Параметри ПІ-регулятора в складі спостерігача приймалися наступними:  $\tau = 20$ ,  $\lambda = 20\ 000$ . Спостерігач зберігає стійкість при достатньо великих інтегральних складових регулятора у своєму складі, що необхідно для забезпечення високої точності ідентифікації потокозчеплення і швидкості, а також для збереження стійкості системи керування при підключенні статора до мережі, коли спостерігачу потрібно устигати відслідковувати значення модуля вектора потокозчеплення статора. На діаграмах рис. 2 також показані активна складова струму ротора й електромагнітний момент. На вал МПЖ діє вентиляторний момент навантаження. У 0.6 с починається рекупераційне гальмування МПЖ до швидкості 50 рад/с. Найбільша динамічна помилка ідентифікації швидкості (0.57 %) була зареєстрована при підключенні статора до мережі, коли ротор обертається з малими ковзаннями. Помилка ідентифікації модуля вектора потокозчеплення статора дорівнює 0.61 %. На графіках рис. 2 синім кольором представлені графіки перехідних процесів фактичних величин швидкості і потокозчеплення статора, а червоним кольором – обчислені спостерігачем значення.

**Висновки**

У процесі синтезу спостерігача потокозчеплення статора і кутової швидкості ротора МПЖ була виявлена необхідність введення до складу рівнянь електромагнітних процесів спостерігача коригувальних зв'язків за неузгодженостями струмів для забезпечення негативної визначеності повної похідної за часом від функції Ляпунова на траєкторіях збуреного руху спостерігача в складі релейної векторної системи керування МПЖ. Коефіцієнти коригувальних зв'язків вийшли залежними від швидкості, що у рівняннях спостерігача для додання йому замкнутості замінені її оцінкою. Стійкість спостерігача з отриманою структурою і досить висока точність ідентифікації потоку і швидкості перевірені методом математичного моделювання в різних режимах роботи МПЖ: регулювання швидкості при закороченому статорі і при підключенні його до мережі, при рекупераційному гальмуванні зі швидкостями нижче синхронної.

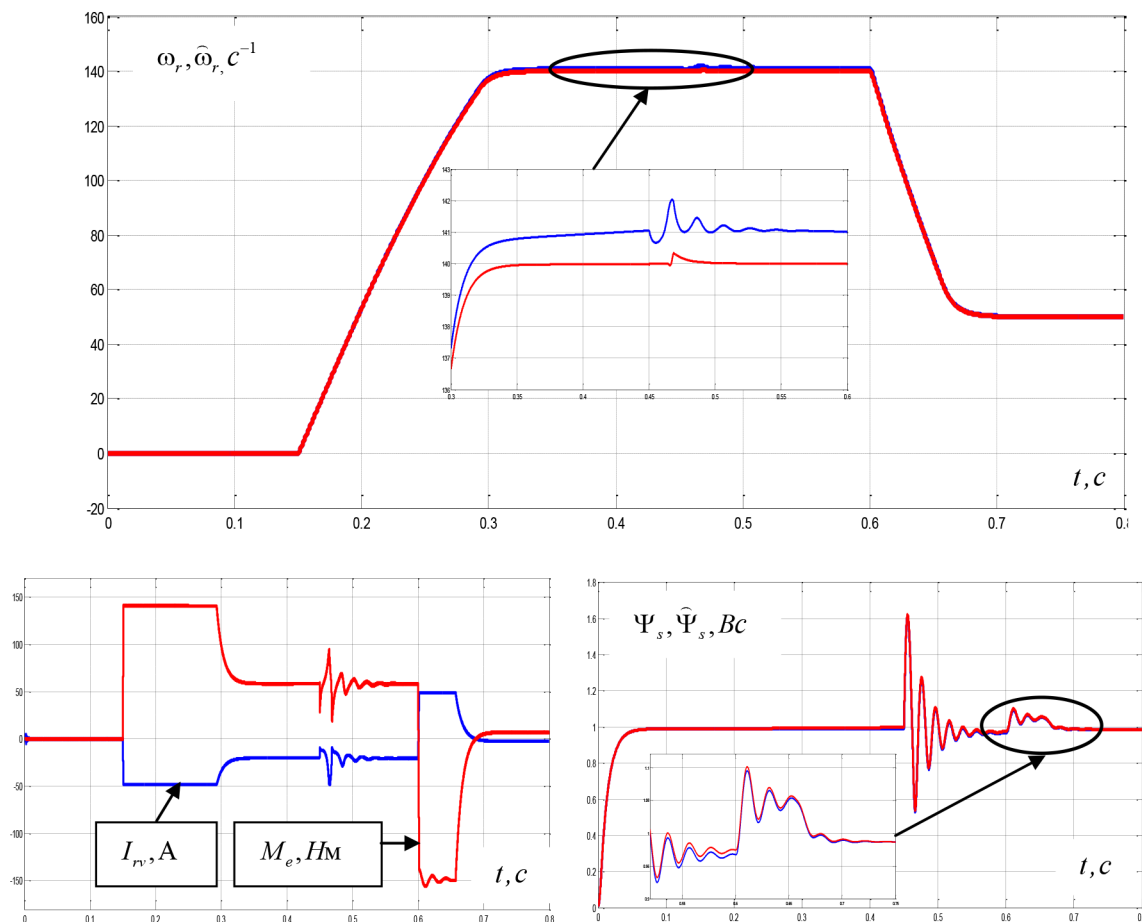


Рис. 2. Перехідні процеси в МПЖ з спостерігачем потокозчеплення статора і швидкості ротора у векторній системі керування

#### Список використаної літератури

1. Ключев О. В. Спостерігач швидкості в системі векторного керування машиною подвійного живлення. *International scientific journal «Internauka»*. 2023. № 3(137), С. 50 – 57. DOI: 10.25313/2520-2057-2023-3-8619
2. Roberto Cardenas, Ruben Pena, Jose Proboste, Greg Asher, Jon Clare, MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators / *IEEE Transactions on energy conversion*. 2005. Volume 20. No. 4, P. 710-718. DOI: 10.1109/TEC.2005.847965
3. Djamilia Cherifi, Yahia Miloud, Robust Speed-sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Drive Using Sliding Mode Rotor Flux Observer / *International Journal of Applied Power Engineering*. 2018. Volume 7, No. 3, P. 235-250. DOI: 10.11591/ijape.v7.i3.pp235-250
4. Gianluca Brando, Adolfo Dannier, Ivan Spina, Performance Analysis of a Full Order Sensorless Control Adaptive Observer for Doubly-Fed Induction Generator in Grid Connected Operation / *Energies* 2021. 14(5), 1254. DOI: 10.3390/en14051254
5. Rogerio Vani Jacomini, Edson Bim, Sensorless Rotor Position Based on MRAS Observer for Doubly Fed Induction Generator / *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. 2015. DOI: 10.1109/COBEP.2015.7420139
6. Jyoti Agrawal, Sanjay Bodkhe, Speed Sensorless Vector Controlled SMPMSM Drive Based on Modified MRAS with Single Current Sensor / *IETE Journal of Research*. 2019. P. 902-916. DOI: 10.1080/03772063.2019.1627915
7. Ajabi-Farshbaf R., Azizian M. R., Yousefzad V., A Novel Algorithm for Rotor Speed Estimation of DFIGs Using Machine Active Power based on MRAS Observer / *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2018. Volume 6, No.1, P. 61–68. DOI: 10.22098/joape.2018.2132.1200
8. Saihi Lakhdar, Bakou Youcef, Ferroudji Fateh, Abdelkader Hadidi, Oulimar Ibrahim, A Hybrid  $H_\infty$ -MRAS Observer of Wind Turbines Conversion Systems based on DFIG / *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*. 2022. Volume 4, No. 1, P. 101–110. DOI: 10.46657/ajresd.2022.4.1.10

## References

1. Kliuiev, O. V. (2023). Sposterihach shvydkosti v systemi vektornoho keruvannia mashynoiu podviinoho zhyvlennia [Speed observer in the vector system control of the doubly fed machine] *International scientific journal "Internauka"*. № 3(137), P. 50–57. DOI: 10.25313/2520-2057-2023-3-8619 [in Ukrainian]
2. Roberto Cardenas, Ruben Pena, Jose Proboste, Greg Asher, & Jon Clare. (2005). MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators/*IEEE Transactions on energy conversion*. Volume 20. No. 4, P. 710–718. DOI: 10.1109/TEC.2005.847965
3. Djamila Cherifi, & Yahia Miloud. (2018). Robust Speed-sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Drive Using Sliding Mode Rotor Flux Observer/*International Journal of Applied Power Engineering*. Volume 7. No. 3, P. 235–250. DOI: 10.11591/ijape.v7.i3.pp235-250
4. Gianluca Brando, Adolfo Dannier, & Ivan Spina. (2021). Performance Analysis of a Full Order Sensorless Control Adaptive Observer for Doubly-Fed Induction Generator in Grid Connected Operation/*Energies* 2021. 14(5), 1254. DOI: 10.3390/en14051254
5. Rogerio Vani Jacomini, & Edson Bim. (2015). Sensorless Rotor Position Based on MRAS Observer for Doubly Fed Induction Generator/*2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. DOI: 10.1109/COBEP.2015.7420139
6. Jyoti Agrawal, & Sanjay Bodkhe. (2019). Speed Sensorless Vector Controlled SMPMSM Drive Based on Modified MRAS with Single Current Sensor/*IETE Journal of Research*. P. 902–916. DOI: 10.1080/03772063.2019.1627915
7. Ajabi-Farshbaf, R., Azizian, M. R., & Yousefzad, V. (2018). A Novel Algorithm for Rotor Speed Estimation of DFIGs Using Machine Active Power based on MRAS Observer/*Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. Volume 6, No. 1, P. 61–68. DOI: 10.22098/joape.2018.2132.1200
8. Saihi Lakhdar, Bakou Youcef, Ferroudji Fateh, Abdelkader Hadidi, & Oulimar Ibrahim. (2022). A Hybrid  $H_{\infty}$ -MRAS Observer of Wind Turbines Conversion Systems based on DFIG/*Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*. Volume 4, No. 1, P. 101–110. DOI: 10.46657/ajresd.2022.4.1.10

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026