

Технічні науки

УДК 62-83:681.513.5

Клюєв Олег Володимирович

кандидат технічних наук,

доцент кафедри Електротехніки і електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет

Klyuyev Oleg

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the

Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Dniprovsky State Technical University

**СПОСТЕРІГАЧ ШВИДКОСТІ В СИСТЕМІ ВЕКТОРНОГО
КЕРУВАННЯ МАШИНОЮ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ
SPEED OBSERVER IN THE VECTOR SYSTEM CONTROL OF THE
DOUBLY FED MACHINE**

***Анотація.** Здійснений синтез спостерігача швидкості обертання ротора машини подвійного живлення з векторною системою керування. Синтез спостерігача заснований на другому методі Ляпунова, який дозволяє визначити структуру функції адаптації, яка настроює модель електромагнітних процесів таким чином, що різниця між вимірюваними змінними та їх оцінками прямує до нуля. Функція адаптації, яка використовує вектори потокозчеплення статора та струму ротора, забезпечує асимптотичну стійкість спостерігача швидкості.*

***Ключові слова:** машина подвійного живлення; векторне керування; спостерігач швидкості обертання ротора; векторний добуток векторів; асимптотична стійкість.*

***Summary.** The synthesis observer of the speed rotation of the rotor of a doubly fed machine with a vector control system was carried out. The synthesis*

of the observer is based on the second Lyapunov method, which allows determining the structure of the adaptation function, which adjusts the model of electromagnetic processes in such a way that the difference between the measured variables and their estimates goes to zero. The adaptation function, which uses the stator flux linkage and rotor current vectors, ensures the asymptotic stability of the speed observer.

Key words: *doubly fed machine; vector control; observer of the speed rotation of the rotor; vector product of vectors; asymptotic stability.*

Постановка задачі. Замкнута за швидкістю ротора система векторного керування асинхронною машиною (АМ) припускає наявність датчика на її валу. Однак на практиці часто виникають задачі регулювання частоти обертання асинхронних електроприводів (ЕП), при розв’язанні яких застосування датчиків координат механічного руху технічно нераціонально або неможливо. У такому випадку необхідно скористатися одним з алгоритмів бездавачевого векторного керування АМ, який припускає прямий вимір тільки електричних величин [1]. Для якісного векторного полеорієнтованого керування асинхронною машиною за роторним колом необхідна ідентифікація опорного вектора потокозчеплення і двох механічних координат: кута повороту ротора і швидкості. Більшість методів бездавачевого векторного керування АМ засновані на тих або інших математичних моделях електромагнітних процесів в електричній машині і сполучають обчислення оцінки частоти обертання з поточною ідентифікацією опорного вектора потокозчеплень АМ, інформацію про кутове положення якого необхідно знати для реалізації принципу векторного керування [2; 3].

В електроприводах з векторним керуванням за ротором, наприклад у машинах подвійного живлення (МПЖ), крім швидкості і кутового положення опорного вектора потокозчеплення статора необхідно

визначати також кутове положення ротора відносно статора [4]. Методика обчислення тригонометричних функцій кута повороту ротора і швидкості асинхронного вентильного каскаду як одного із різновидів МПЖ приводиться в [5]. Однак для визначення швидкості потрібно проводити операцію диференціювання струмів, що в системах з релейним керуванням представляє самостійну непросту задачу.

Широке поширення одержали спостерігачі швидкості в ЕП на основі АМ з короткозамкненим ротором, у яких керування здійснюється за статором. Для знаходження швидкості можливо використовувати спостерігачі, засновані на порівнянні векторів потокозчеплень або електрорушійних сил [6]. Однак в асинхронних електроприводах з керуванням за статором не потрібно обчислювати кут повороту ротора для реалізації векторної бездавачевої системи керування [7].

Формулювання мети дослідження. Ставиться задача з використанням рівнянь електромагнітних процесів в АМ, виразів координатних перетворень і другого методу Ляпунова синтезувати спостерігач швидкості та опорного вектора потокозчеплення статора для застосування його в бездавачевій релейно-векторній системі керування МПЖ.

Виклад основного матеріалу. Електромагнітні процеси, які протікають в електричній машині, містять інформацію про необхідні механічні змінні, яка може бути отримана шляхом виміру електричних параметрів статора і ротора.

Рівняння електромагнітних контурів МПЖ в осях u, v приводяться в [5] і є рівняннями узагальненої електричної машини в ортогональних осях координат, які обертаються зі швидкістю ω_k :

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

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

Одержимо співвідношення для визначення проекцій опорного вектора потокозчеплення статора $\vec{\Psi}_s$ на координатні осі d,q. Друге рівняння системи (1) електричної рівноваги роторного кола у вигляді проекцій при $\omega_k = \omega$ (осі d, q) буде наступним:

$$U_{rd} = p\Psi_{rd} + R_r I_{rd}; \quad U_{rq} = p\Psi_{rq} + R_r I_{rq}, \quad (3)$$

де $p = d/dt$ — оператор диференціювання.

Запишемо рівняння потокозчеплень (2) в осях d, q:

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; & \Psi_{rd} &= L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \\ \Psi_{sq} &= L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; & \Psi_{rq} &= L_r I_{rq} + L_m I_{sq}. \end{aligned} \quad (4)$$

Виразимо з першої пари рівнянь проекції струму статора і підставимо їх співвідношення в наступні два рівняння. Тоді після перетворень одержимо:

$$\Psi_{rd} = k_s \Psi_{sd} + L_\delta I_{rd}; \quad \Psi_{rq} = k_s \Psi_{sq} + L_\delta I_{rq}, \quad (5)$$

де $k_s = L_m/L_s$; $L_\delta = (L_s L_r - L_m^2)/L_s$.

Якщо у формулах (3) замість Ψ_{rd} і Ψ_{rq} записати вирази (5), то приходимо до рівностей:

$$U_{rd} = k_s p\Psi_{sd} + L_\delta pI_{rd} + R_r I_{rd}; \quad U_{rq} = k_s p\Psi_{sq} + L_\delta pI_{rq} + R_r I_{rq}. \quad (6)$$

Запишемо рівняння рівноваги напруг статора в осях d,q, що виходять з першого рівняння (1) при $\omega_k = \omega$:

$$U_{sd} = R_s I_{sd} + p\Psi_{sd} - \omega\Psi_{sq}; \quad U_{sq} = R_s I_{sq} + p\Psi_{sq} + \omega\Psi_{sd}. \quad (7)$$

З першої пари рівнянь (4) випливає:

$$I_{sd} = \frac{\Psi_{sd} - L_m I_{rd}}{L_s}; \quad I_{sq} = \frac{\Psi_{sq} - L_m I_{rq}}{L_s}. \quad (8)$$

Після підстановки виразів (8) у (7) приходимо до рівнянь

$$p\Psi_{sd} = -\frac{R_s}{L_s} \Psi_{sd} + k_s R_s I_{rd} + \omega\Psi_{sq} + U_{sd};$$

$$p\Psi_{sq} = -\frac{R_s}{L_s}\Psi_{sq} + k_s R_s I_{rq} - \omega\Psi_{sd} + U_{sq}. \quad (9)$$

Якщо в рівняння (6) підставити вирази (9), то після перетворень приходимо до наступних рівнянь для струмів ротора

$$\begin{aligned} pI_{rd} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rd} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sd} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega\Psi_{sq} + \frac{L_s U_{rd} - L_m U_{sd}}{L_s L_r - L_m^2}; \\ pI_{rq} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rq} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sq} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega\Psi_{sd} + \frac{L_s U_{rq} - L_m U_{sq}}{L_s L_r - L_m^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Якщо об'єднати рівняння (9) і (10), то одержимо систему рівнянь електромагнітних контурів МПЖ:

$$\begin{aligned} pI_{rd} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rd} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sd} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega\Psi_{sq} + \frac{L_s U_{rd} - L_m U_{sd}}{L_s L_r - L_m^2}; \\ pI_{rq} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rq} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sq} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega\Psi_{sd} + \frac{L_s U_{rq} - L_m U_{sq}}{L_s L_r - L_m^2}; \\ p\Psi_{sd} &= -\frac{R_s}{L_s} \Psi_{sd} + k_s R_s I_{rd} + \omega\Psi_{sq} + U_{sd}; \\ p\Psi_{sq} &= -\frac{R_s}{L_s} \Psi_{sq} + k_s R_s I_{rq} - \omega\Psi_{sd} + U_{sq}. \end{aligned} \quad (11)$$

Рівняння електромагнітних контурів МПЖ (11) у матричній формі записуються в такий спосіб:

$$p \begin{pmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & -a_{14}\omega \\ 0 & -a_{22} & a_{23}\omega & a_{24} \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & \omega \\ 0 & a_{42} & -\omega & -a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & -b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & -b_{24} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{rd} \\ U_{rq} \\ U_{sd} \\ U_{sq} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\text{де } a_{11} = a_{22} = \frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a_{13} = a_{24} = \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a_{14} = a_{23} = \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2};$$

$$a_{31} = a_{42} = k_s R_s ; a_{33} = a_{44} = \frac{R_s}{L_s} ; b_{11} = b_{22} = \frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2} ;$$

$$b_{13} = b_{24} = \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} ; b_{33} = b_{44} = 1.$$

Рівняння (12) можна записати в матричній формі:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU, \quad (13)$$

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

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

Спершу будемо будувати спостерігач швидкості без коригувальної матриці наступного вигляду

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = \hat{A}\hat{X} + BU, \quad (15)$$

де вектор \hat{X} і матриця \hat{A} такі ж, як у виразах (13), тільки замість електромагнітних змінних і швидкості беруться їхні оцінки.

Якщо параметри АМ (13) і спостерігача (15) збігаються, то в коригувальній матриці немає необхідності. Передбачається, що підстроювання матриці $\hat{A} \rightarrow A$ і вектора $\hat{X} \rightarrow X$ здійснюється сигналом оцінки швидкості $\hat{\omega}$. Якщо спостерігач забезпечує рівність $\hat{\omega} = \omega$, то при цьому будуть досягнуті умови $\hat{A} = A, \hat{X} = X$. Це є допущення, покладене в основу синтезу спостерігача, яке можна перевірити тільки наприкінці процедури синтезу спостерігача методом математичного моделювання.

Уведемо позначення

$$\mathbf{e} = \widehat{\mathbf{X}} - \mathbf{X} = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{I}}_{rd} - \mathbf{I}_{rd} & \widehat{\mathbf{I}}_{rq} - \mathbf{I}_{rq} & \widehat{\Psi}_{sd} - \Psi_{sd} & \widehat{\Psi}_{sq} - \Psi_{sq} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{I}_{rd} & \Delta \mathbf{I}_{rq} & \Delta \Psi_{sd} & \Delta \Psi_{sq} \end{pmatrix}^T$$

$$\Delta \omega = \widehat{\omega} - \omega, \Delta \mathbf{A} = \widehat{\mathbf{A}} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_{14} \Delta \omega \\ 0 & 0 & a_{23} \Delta \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \omega \\ 0 & 0 & -\Delta \omega & 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Відніmemo з рівняння (15) рівняння (13) з урахуванням (16):

$$\frac{d\widehat{\mathbf{X}}}{dt} - \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \frac{d\mathbf{e}}{dt} = \widehat{\mathbf{A}}\widehat{\mathbf{X}} - \mathbf{A}\mathbf{X} = (\mathbf{A} + \Delta \mathbf{A})\widehat{\mathbf{X}} - \mathbf{A}(\widehat{\mathbf{X}} - \mathbf{e}) = \mathbf{A}\mathbf{e} + \Delta \mathbf{A}\widehat{\mathbf{X}}. \quad (17)$$

Введемо позитивно визначену функцію-кандидат у функції Ляпунова для даного спостерігача

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \frac{\Delta \omega^2}{\lambda} = \Delta \mathbf{I}_{rd}^2 + \Delta \mathbf{I}_{rq}^2 + \Delta \Psi_{sd}^2 + \Delta \Psi_{sq}^2 + \frac{\Delta \omega^2}{\lambda} > 0. \quad (18)$$

Знаходимо повну похідну за часом від функції (18):

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{d\mathbf{e}^T}{dt} \right) \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \left(\frac{d\mathbf{e}}{dt} \right) + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\Delta \omega}{dt} = \left(\frac{d\mathbf{e}^T}{dt} \right) \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \left(\frac{d\mathbf{e}}{dt} \right) + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\widehat{\omega}}{dt}. \quad (19)$$

Вираз (19) записаний при ще одній умові: швидкість ротора ω змінюється повільно в порівнянні із сигналом її оцінки $\widehat{\omega}$, тобто можна прийняти $d\omega/dt = 0$. Перетворимо вираз (19) з урахуванням формули (17) для похідної відхилень:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \mathbf{e}^T \mathbf{A}^T \mathbf{e} + (\Delta \mathbf{A} \widehat{\mathbf{X}})^T \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{A} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T (\Delta \mathbf{A} \widehat{\mathbf{X}}) + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\widehat{\omega}}{dt} = \\ &= \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T + \mathbf{A}) \mathbf{e} + (\Delta \mathbf{A} \widehat{\mathbf{X}})^T \mathbf{e} + \mathbf{e}^T (\Delta \mathbf{A} \widehat{\mathbf{X}}) + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\widehat{\omega}}{dt} = \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T + \mathbf{A}) \mathbf{e} + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\widehat{\omega}}{dt} + \\ &+ 2a_{23} \widehat{\Psi}_{sd} \Delta \omega \Delta \mathbf{I}_{rq} - 2a_{14} \widehat{\Psi}_{sq} \Delta \omega \Delta \mathbf{I}_{rd} - 2\widehat{\Psi}_{sd} \Delta \omega \Delta \Psi_{sq} + 2\widehat{\Psi}_{sq} \Delta \omega \Delta \Psi_{sd}. \end{aligned} \quad (20)$$

Розіб'ємо вираз (20) на три доданки

$$\frac{dV}{dt} = S_1 + S_2 + S_3,$$

$$\text{де } S_1 = \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T + \mathbf{A}) \mathbf{e}; \quad S_2 = 2\widehat{\Psi}_{sq} \Delta \omega \Delta \Psi_{sd} - 2\widehat{\Psi}_{sd} \Delta \omega \Delta \Psi_{sq};$$

$$S_3 = 2a_{23} \widehat{\Psi}_{sd} \Delta\omega \Delta I_{rq} - 2a_{14} \widehat{\Psi}_{sq} \Delta\omega \Delta I_{rd} + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\widehat{\omega}}{dt}. \quad (21)$$

Негативність доданка S_3 можна забезпечити за допомогою закону адаптації. Доданок S_2 прямує в нуль у випадку стійкого спостерігача, що можна бачити з наступних перетворень

$$\begin{aligned} S_2 &= 2\widehat{\Psi}_{sq} \Delta\omega \Delta\Psi_{sd} - 2\widehat{\Psi}_{sd} \Delta\omega \Delta\Psi_{sq} = 2\Delta\omega (\widehat{\Psi}_{sq} \Delta\Psi_{sd} - \widehat{\Psi}_{sd} \Delta\Psi_{sq}); \\ \widehat{\Psi}_{sq} \Delta\Psi_{sd} - \widehat{\Psi}_{sd} \Delta\Psi_{sq} &= \widehat{\Psi}_{sq} (\widehat{\Psi}_{sd} - \Psi_{sd}) - \widehat{\Psi}_{sd} (\widehat{\Psi}_{sq} - \Psi_{sq}) = \\ &= \widehat{\Psi}_{sq} \widehat{\Psi}_{sd} - \widehat{\Psi}_{sq} \Psi_{sd} - \widehat{\Psi}_{sd} \widehat{\Psi}_{sq} + \Psi_{sq} \widehat{\Psi}_{sd} = \Psi_{sq} \widehat{\Psi}_{sd} - \widehat{\Psi}_{sq} \Psi_{sd} = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

що справедливо при асимптотичній стійкості спостерігача, коли $\widehat{\Psi}_{sd} = \Psi_{sd}$, $\widehat{\Psi}_{sq} = \Psi_{sq}$. Аналіз за допомогою критерію Сильвестра показує, що негативна визначеність квадратичної форми S_1 з матрицею $A^T + A$ не гарантується. Однак, методом математичного моделювання перевірено, що якщо зневажити доданком S_1 і вивести алгоритм ідентифікації швидкості шляхом прирівнювання нулю доданка S_3 , то виходить стійкий спостерігач.

З умови рівності нулю S_3 пропонується наступний закон адаптації

$$2a_{23} \widehat{\Psi}_{sd} \Delta\omega \Delta I_{rq} - 2a_{14} \widehat{\Psi}_{sq} \Delta\omega \Delta I_{rd} + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\widehat{\omega}}{dt} = 0;$$

$$\widehat{\Psi}_{sd} \Delta I_{rq} - \widehat{\Psi}_{sq} \Delta I_{rd} + \frac{1}{K_i} \frac{d\widehat{\omega}}{dt} = 0.$$

$$\widehat{\omega} = -K_i \int (\widehat{\Psi}_{sd} \Delta I_{rq} - \widehat{\Psi}_{sq} \Delta I_{rd}) dt = -K_i \int \begin{vmatrix} \widehat{\Psi}_{sd} & \widehat{\Psi}_{sq} \\ \Delta I_{rd} & \Delta I_{rq} \end{vmatrix} dt = -K_i \int (\widehat{\Psi}_s \times \Delta I_r) dt. \quad (23)$$

Для кращої збіжності додаємо пропорційну складову і тоді вийде закон адаптації реалізований у вигляді ПІ – регулятора

$$\widehat{\omega} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \left[\widehat{\Psi}_{sq} (\widehat{I}_{rd} - I_{rd}) - \widehat{\Psi}_{sd} (\widehat{I}_{rq} - I_{rq}) \right]. \quad (24)$$

Якщо до системи рівнянь (15) додати закон адаптації (24), то одержуємо наступну систему рівнянь спостерігача

$$\begin{aligned} p\hat{I}_{rd} &= -a_{11}\hat{I}_{rd} + a_{13}\hat{\Psi}_{sd} - a_{14}\hat{\omega}\hat{\Psi}_{sq} + b_{11}u_{rd} - b_{13}u_{sd}; \\ p\hat{I}_{rq} &= -a_{22}\hat{I}_{rq} + a_{24}\hat{\Psi}_{sq} + a_{23}\hat{\omega}\hat{\Psi}_{sd} + b_{22}u_{rq} - b_{24}u_{sq}; \\ p\hat{\Psi}_{sd} &= a_{31}\hat{I}_{rd} - a_{33}\hat{\Psi}_{sd} + \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sq} + b_{33}u_{sd}; \\ p\hat{\Psi}_{sq} &= a_{42}\hat{I}_{rq} - a_{44}\hat{\Psi}_{sq} - \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sd} + b_{44}u_{sq}; \end{aligned} \quad (25)$$
$$\hat{\omega} = \omega = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \left[\hat{\Psi}_{sq} (\hat{I}_{rd} - I_{rd}) - \hat{\Psi}_{sd} (\hat{I}_{rq} - I_{rq}) \right].$$

Структурна схема спостерігача, яка відповідає системі рівнянь (25), показана на рисунку 1. Сигнали спостерігача оцінки швидкості $\hat{\omega}$, проєкцій вектора потокозчеплення статора $\hat{\Psi}_{sd}$, $\hat{\Psi}_{sq}$ на осі d,q використовуються в системі векторного керування електроприводом.

У середовищі Matlab створена математична модель МПЖ із векторною системою керування й у коло зворотного зв'язку включений спостерігач швидкості (25). Перехідні процеси розраховувалися для МПЖ, виконаної на базі асинхронної машини з фазним ротором типу 4AK160S4У3 з наступними технічними даними: $P_n = 11\text{кВт}$, $U_{лн} = 380\text{В}$, $n_c = 1500\text{ об/хв}$, $U_2 = 305\text{В}$. На рисунках 2, 3 зображені графіки для різних режимів роботи МПЖ. До вала ротора МПЖ прикладається вентиляторний момент навантаження. Представлено наступні змінні стану МПЖ: швидкість ротора та її оцінка на виході спостерігача швидкості, електромагнітний момент, модуль потокозчеплення статора, реактивна складова струму ротора, активна складова струму ротора, струм намагнічування.

Спочатку реалізується пуск електропривода до 75 рад/с при живленні ротора від перетворювача частоти при закороченому статорі. Далі ста торне коло у 0,8с підключається до мережі.

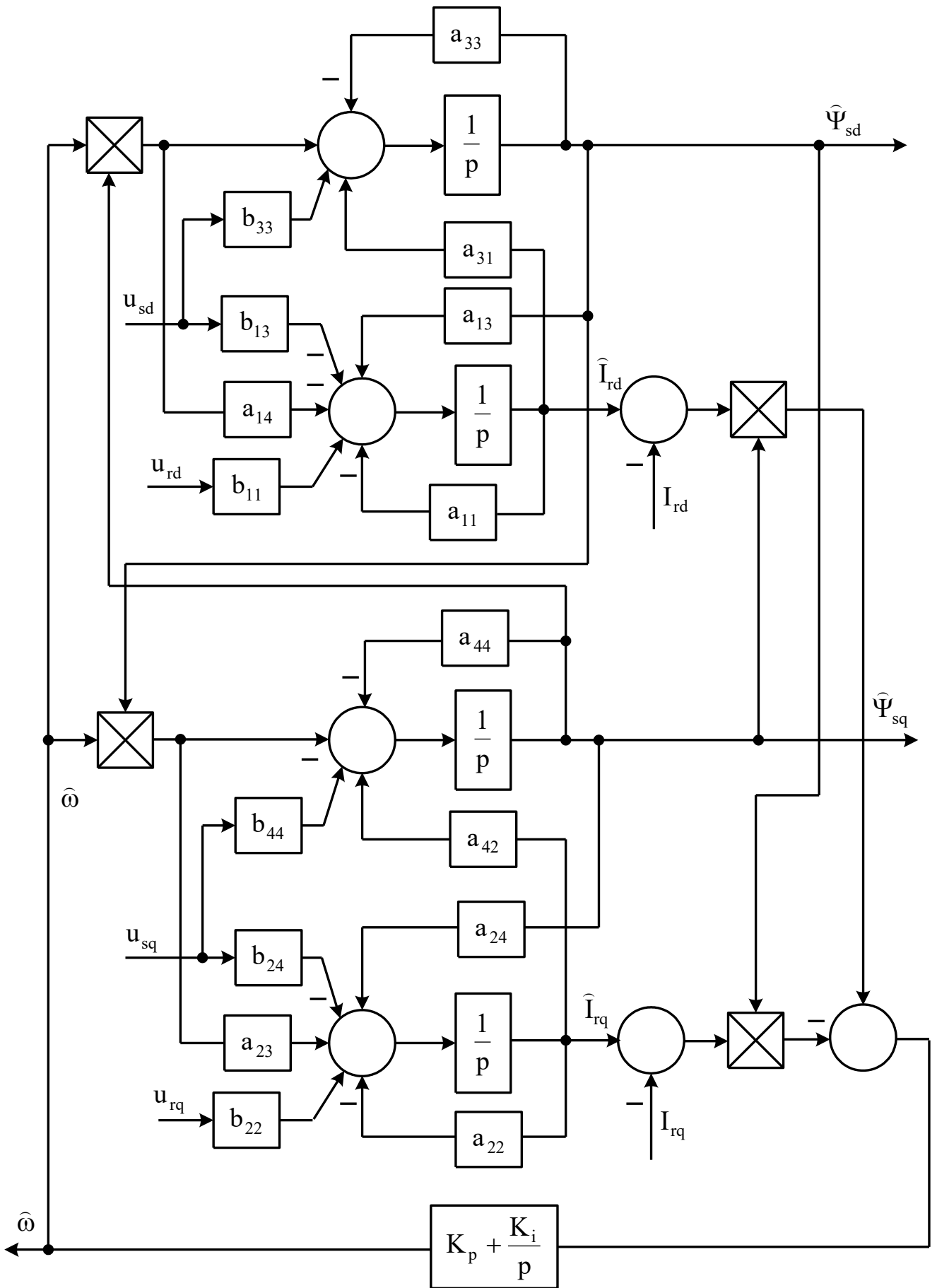


Рис. 1. Спостерігач швидкості для машини подвійного живлення

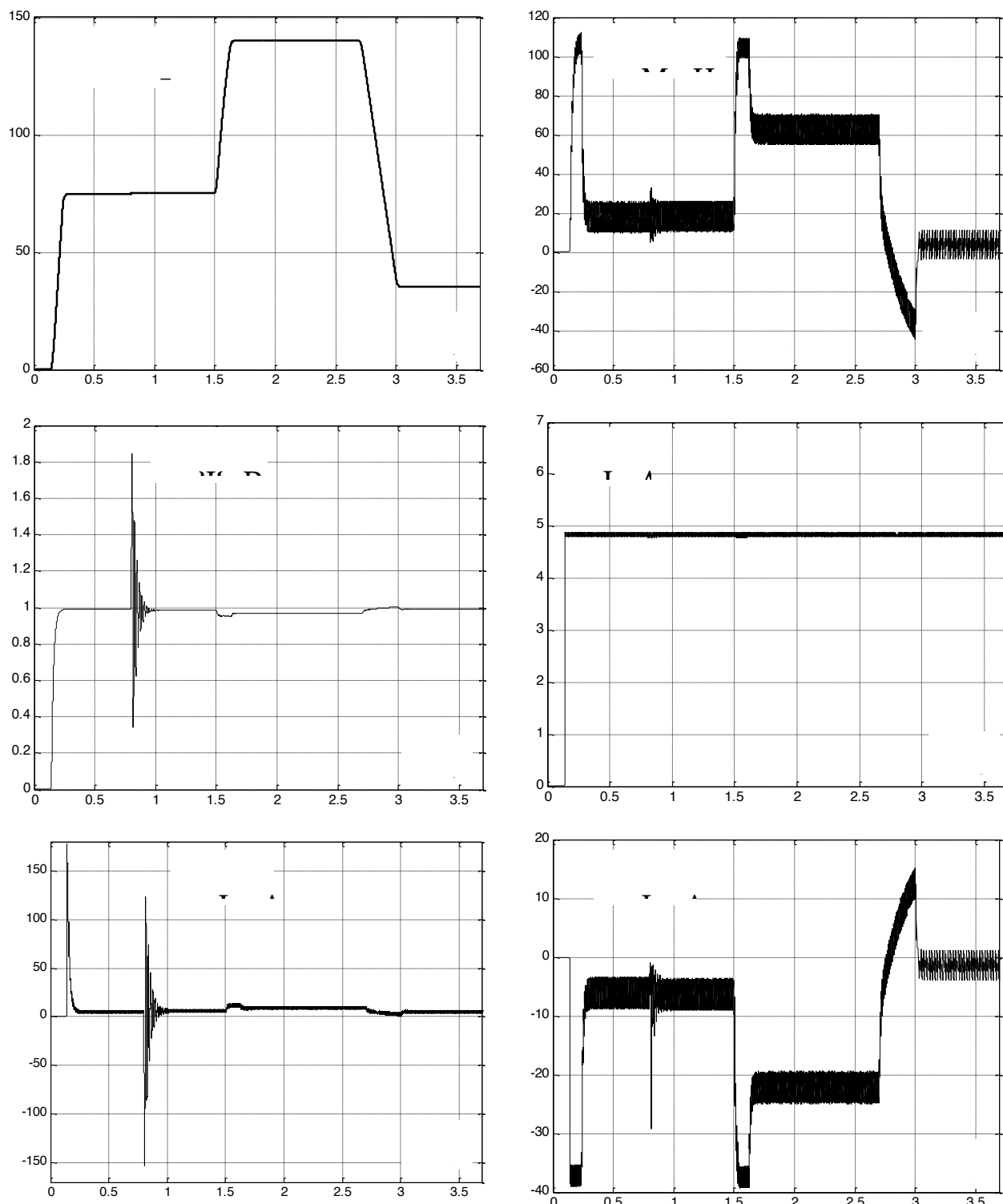


Рис. 2. Перехідні процеси в МПЖ з спостерігачем швидкості в складі системи векторного керування

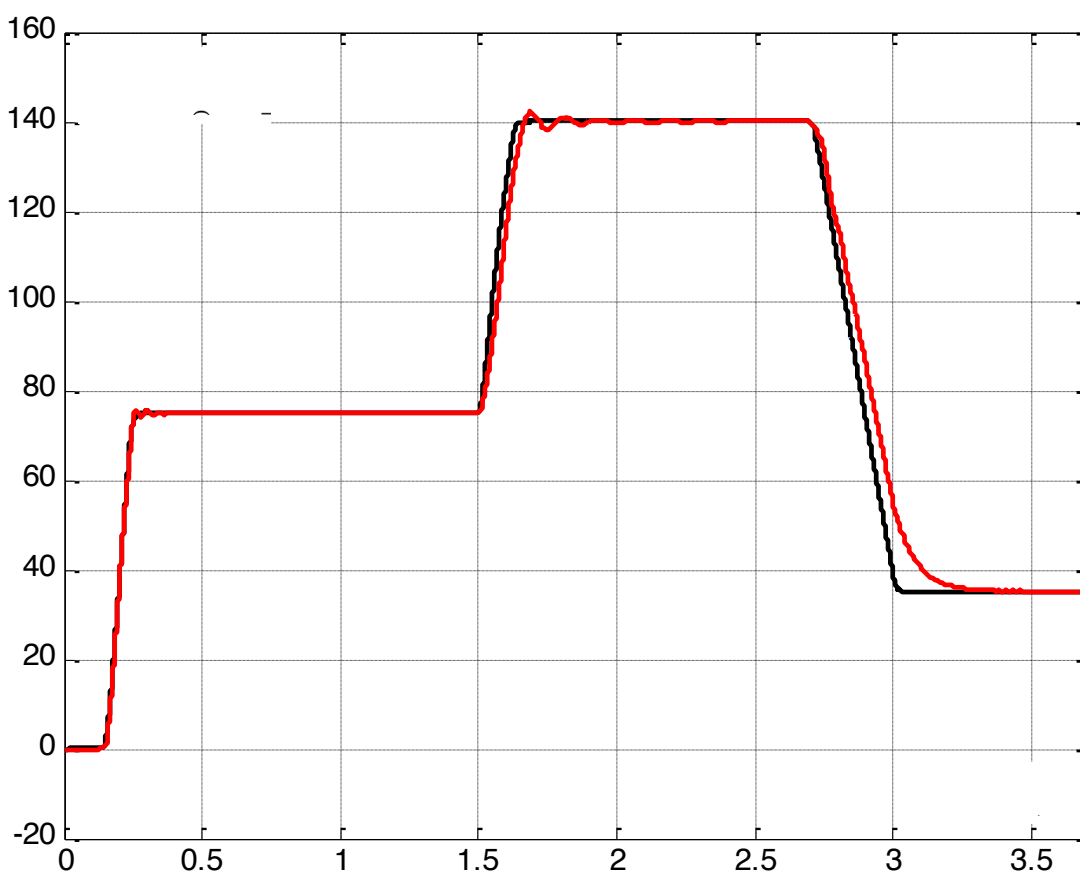


Рис. 3. Швидкість ротора МПЖ (чорний колір) та її оцінка (червоний колір) на виході спостерігача

Потім МПЖ нарощує швидкість до 140 рад/с з подальшим гальмуванням до швидкості 35 рад/с. В усіх режимах, як видно з графіків на рисунку 3, сигнал спостерігача швидкості достатньо точно відображає реальну швидкість ротора. Існує динамічна помилка оцінювання швидкості спостерігачем при відсутній статичній помилці. Підключення статора до мережі супроводжується швидко гаснучими коливаннями реактивного струму ротора і потокозчеплення статора. При цьому струм намагнічування стабілізується його регулятором на заданому рівні і коливання потокозчеплення статора практично не впливають на якість регулювання електромагнітного моменту. Спостерігач зберігає асимптотичну стійкість при всіх режимах роботи електропривода — при

різних швидкостях і навантаженнях. Асимптотична стійкість спостерігача забезпечує необхідну точність оцінювання швидкості.

Висновки. Здійснений синтез спостерігача швидкості обертання ротора машини подвійного живлення для застосування його в бездавачевій системі векторного керування. У якості вихідних математичних моделей використовувалися рівняння електромагнітних процесів в асинхронній машині з фазним ротором та координатних перетворень. Синтез спостерігача заснований на другому методі Ляпунова, що дозволяє визначити структуру функції адаптації, яка набудовує адаптивну модель таким чином, що різниця між виходами адаптивної й еталонної моделей прямує до нуля. Визначено, що функція адаптації являє собою векторний добуток векторів потокозчеплення статора і неузгодженостей струмів ротора.

Література

1. Holtz J. Sensorless control of induction motor drives // Proc. of the IEEE. 2002. Vol. 90. № 8. P. 1359-1394.
2. Montanari M., Peresada S. Tilli A. Speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motors based on high gain speed estimation.- Automatica. 2006. Vol. 41, Iss. 10. P. 1637-1650. doi: 10.1016/j.automatica.2006.05.021.
3. Klyuyev O. Speed observer of the rotation rotor in the system of vector control asynchronous machine // Sciences of Europe. Praha, 2023. No. 110. P. 82-89. doi: 10.5281/zenodo.7618463.
4. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Побудова ідентифікатора кутового положення ротора в системах векторного керування машинами подвійного живлення. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки).*

- Кам'янське, 2021. Вип. 2(39). С. 74-81. doi: 10.31319/2519-2884.39.2021.9.
5. Клюев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Системи керування асинхронними вентильними каскадами. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 294 с.
 6. Клюев О.В., Колесник Д.А. Наблюдатель скорости в асинхронном электроприводе с частотным управлением // Sciences of Europe. Praha, 2021. Vol. 1, No 80. P. 38-44. doi:10.24412/3162-2364-2021-80-1-38-44.
 7. Клюев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Спостерігач швидкості обертання і потокозчеплення ротора в системі векторного керування асинхронним електроприводом. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2022. Вип. 2 (41). С. 89-97. doi: 10.31319/2519-2884.41.2022.10.