

**Олег Володимирович Ключев¹, Олександр Валентинович Садовой²,
Юлія Віталіївна Сохіна³**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: kluev2006@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>. Scopus Author ID: 57217113986

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри електротехніки та електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: sadovoyav@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9739-3661>. Scopus Author ID: 57170694900

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: jvsokhina@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4329-5182>. Scopus Author ID: 57205445522

**БЕЗДАТЧИКОВА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МАШИНОЮ
ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА КАЛМАНА**

У статті розроблена бездатчикова система керування машиною подвійного живлення (МПЖ), у якій замість окремих ідентифікаторів змінних стану застосовується фільтр Калмана (ФК), який оцінює всі необхідні для векторного керування за колом ротора змінні електричної машини: проекції вектора потокозчеплення статора на ортогональні осі, кутову швидкість обертання ротора та його кут повороту відносно статора. Вхідними впливами спостерігача прийняті тільки керуючі напруги роторного кола, а проекції вектора нерегульованої напруги статора введени до складу матриці стану спостерігача Калмана як величини, що функціонально залежать від кута повороту ротора. Такий підхід дозволив синтезувати спостерігач Калмана, при якому відсутні автоколивання в процесі регулювання швидкості й система керування зберігає асимптотичну стійкість при різних рівнях стабілізації швидкості.

Ключові слова: машина подвійного живлення; векторне бездатчикове керування; релейний регулятор; ідентифікація координат; фільтр Калмана.

Рис.: 4. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Ідентифікувати опорний вектор потокозчеплення статора й механічні координати кута повороту ротора і його швидкість необхідно для реалізації векторного полеорієнтованого керування асинхронною машиною по колу ротора. Для ідентифікації цих координат створюють обчислювальні алгоритми, які використовують сигнали з датчиків струмів і напруг статора і ротора асинхронної машини (АМ). У статтях [1; 2] обґрунтовано, що у ролі спостерігача ефективно використовувати фільтр Калмана в асинхронних електроприводах із векторним керуванням для визначення їх змінних стану при випадкових перешкодах вимірів струмів і напруг. У цих статтях опорний вектор потокозчеплення ротора і його кутову швидкість визначав спостерігач Калмана. В алгоритмі спостерігача для його взаємодії з об'єктом використовувалося порівняння обчислених і обмірюваних значень проекцій вектора струму статора на осі α, β для стійкості процесу оцінювання. Рівняння спостерігача, що склали розширений фільтр Калмана і матриці Якобі, були п'ятого порядку. При векторному керуванні за колом ротора АМ крім опорного вектора і швидкості ротора ще необхідно визначати кут повороту ротора. Якщо застосувати очевидний підхід і кут повороту обчислювати інтегруванням отриманої від спостерігача оцінки швидкості, то векторна система керування машиною подвійного живлення стає непрацездатною, тому що немає асимптотичної стійкості. У цьому випадку виникають автоколивання опорного вектора потокозчеплення статора, які призводять до автоколивань електромагнітного моменту і кутової швидкості. Тому актуальною є задача синтезу спостерігача з додаванням у його склад рівняння кута повороту й залежних від нього змінних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У бездатчикових системах керування машинами подвійного живлення широко використовують фільтр Калмана. У статті [3] у коло ротора асинхронного генератора з подвійним живленням включений перетворювач частоти з активним випрямлячем з боку мережі. Спостерігач Калмана використовується для оцінки п'яти основних електричних параметрів схеми заміщення генератора. У [4]

запропонована система керування МПЖ, яка використовує еталонну прогнозуючу модель для передбачення струмів ротора вперед на один крок дискретизації за часом. Для оцінки кутової швидкості ротора і його кута повороту відносно статора використовується розширений фільтр Калмана, а для ідентифікації опорного вектора потокозчеплення статора застосовується окремий естиматор. У [5] проєкції опорного вектора потокозчеплення статора визначаються інтегруванням ЕРС статора, а спостерігач має знижений порядок і використовується для ідентифікації механічних координат МПЖ. У [6] розглядається високовольтний електропривод з п'ятирівневим інвертором і двома обмотками на статорі асинхронної машини. Нейронна мережа застосовується для формування послідовності керуючих імпульсів комутації силових транзисторів інвертора напруги. У колі зворотного зв'язку спостерігач Калмана вирішує стандартну задачу ідентифікації опорного вектора потокозчеплення і кутової швидкості ротора АМ. У [7] представлена модель безконтактної машини подвійного живлення і на її основі синтезований фільтр Калмана для обчислення проєкцій вектора потокозчеплення статора на осі d, q . У статті [8] пропонується робастне керування безщітковою машиною подвійного живлення на основі синергетичної теорії керування. Підвищення ККД вітрогенератора за схемою МПЖ досягається використанням регулятора з нечіткою логікою, а для оцінки швидкості ротора застосовується розширений фільтр Калмана.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Якщо фільтр Калмана використовувати тільки для ідентифікації проєкцій опорного вектора потокозчеплення статора і швидкості ротора, а кут повороту ротора (інформація про нього необхідна при формуванні впливів, що управляють, в роторі МПЖ) обчислювати як інтеграл від оцінки швидкості, то в системі керування виникають автоколивання опорного вектора потокозчеплення, а разом з ним електромагнітного моменту та швидкості ротора. Тоді потрібно збільшувати розмірність спостерігача Калмана на одиницю за рахунок введення у нього рівняння кута повороту ротора й у системі керування використовувати оцінку кута, що визначається спостерігачем. Тоді проєкції вектора напруги мережі, до якої підключається статор МПЖ, на осі, орієнтовані за вектором потокозчеплення статора, потрібно також вводити до складу спостерігача та його матриці Якобі. Робота замкнутої релейно-векторної системи керування МПЖ з описаним спостерігачем Калмана залишилася недослідженою.

Мета дослідження. Аналіз публікацій показав, що фільтр Калмана використовується для ідентифікації механічних координат, параметрів і опорного вектора потокозчеплення МПЖ у системах керування з різною структурою. При цьому входними впливами є чотири проєкції векторів напруг статора і ротора, а матриця адаптації містить чотири коригувальних коефіцієнти. У роботі ставиться задача дослідити динаміку МПЖ зі спостерігачем Калмана, який для взаємодії з об'єктом керування використовує тільки дві проєкції вектора струму ротора, а як входні впливи виступають лише проєкції вектора напруги ротора.

Виклад основного матеріалу. Запишемо рівняння електромагнітних процесів машини подвійного живлення в осях координат d, q . При постійній швидкості обертання ротора відому систему рівнянь електромагнітних процесів можна доповнити рівнянням руху і складену в такий спосіб модель покласти в основу синтезу фільтра Калмана. Система рівнянь у матричній формі має вигляд [9]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \\ \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \\ \hat{\omega}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & -a_{14}\hat{\omega}_e & 0 \\ 0 & -a_{22} & a_{23}\hat{\omega}_e & a_{24} & 0 \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & \hat{\omega}_e & 0 \\ 0 & a_{42} & -\hat{\omega}_e & -a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \\ \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \\ \hat{\omega}_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & -b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & -b_{24} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{rd} \\ U_{rq} \\ U_{sd} \\ U_{sq} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \widehat{I}_{rd} \\ \widehat{I}_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widehat{I}_{rd} & \widehat{I}_{rq} & \widehat{\Psi}_{sd} & \widehat{\Psi}_{sq} & \widehat{\omega}_e \end{pmatrix}^T, \quad (2)$$

де коефіцієнти в системі рівнянь (1) дорівнюють:

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

Система рівнянь (1), (2) вважається найбільш зручною для побудови фільтра Калмана стосовно до асинхронної машини при керуванні за ротором. Однак це твердження справедливе тільки для випадку, коли в системі керування присутній датчик положення ротора й потрібно ідентифікувати швидкість і вектор потокозчеплення. Якщо ж датчик положення ротора відсутній і, крім швидкості ротора і потокозчеплення статора, потрібно ще ідентифікувати і кут повороту ротора, то вихідну систему рівнянь необхідно формувати інакше. Проекції векторів напруг і струмів статора і ротора повинні бути представлені в осях координат, зв'язаних з цими частинами машини.

Напруга статора не регулюється і проекції її вектора на осі d, q , тобто величини U_{sd}, U_{sq} , залежать від кута повороту ротора γ . Справедливі координатні перетворення проекцій вектора напруги статора з осей α, β в осі ротора d, q :

$$U_{sd}(\gamma) = U_{s\alpha} \cos \gamma + U_{s\beta} \sin \gamma; \quad U_{sq}(\gamma) = U_{s\beta} \cos \gamma - U_{s\alpha} \sin \gamma. \quad (4)$$

У цьому випадку незалежними керуючими впливами будуть тільки напруги ротора U_{rd}, U_{rq} , а проекції напруг статора $U_{sd}(\gamma), U_{sq}(\gamma)$ входять до складу правих частин такої системи рівнянь, яка приймається за вихідну:

$$p \begin{bmatrix} \widehat{I}_{rd} \\ \widehat{I}_{rq} \\ \widehat{\Psi}_{sd} \\ \widehat{\Psi}_{sq} \\ \widehat{\omega}_e \\ \widehat{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{11} \widehat{I}_{rd} + a_{13} \widehat{\Psi}_{sd} - a_{14} \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sq} - b_{13} U_{sd}(\widehat{\gamma}) \\ -a_{22} \widehat{I}_{rq} + a_{23} \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sd} + a_{24} \widehat{\Psi}_{sq} - b_{24} U_{sq}(\widehat{\gamma}) \\ a_{31} \widehat{I}_{rd} - a_{33} \widehat{\Psi}_{sd} + \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sq} + b_{33} U_{sd}(\widehat{\gamma}) \\ a_{42} \widehat{I}_{rq} - \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sd} - a_{44} \widehat{\Psi}_{sq} + b_{44} U_{sq}(\widehat{\gamma}) \\ 0 \\ \widehat{\omega}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Як оцінка вектора стану системи використовується такий вектор

$$\widehat{X} = (\widehat{x}_{11} \widehat{x}_{21} \widehat{x}_{31} \widehat{x}_{41} \widehat{x}_{51} \widehat{x}_{61})^T = (\widehat{I}_{rd} \widehat{I}_{rq} \widehat{\Psi}_{sd} \widehat{\Psi}_{sq} \widehat{\omega}_e \widehat{\gamma})^T. \quad (6)$$

Цей вектор містить струм ротора, потік статора, швидкість обертання ротора і його кут повороту. Оцінка вимірюваних величин струмів ротора використовується при адаптації моделі спостерігача.

При побудові цифрових систем безперервні диференціальні рівняння замінюються різницевиими. Якщо період дискретизації за часом прийняти рівним T , то в момент часу, що відповідає k -му циклу програми для k -го і $(k-1)$ -го відліків можна записати

$$\frac{d}{dt} \widehat{X} \approx \frac{1}{T} (\widehat{X}_k - \widehat{X}_{k-1}). \quad (7)$$

З урахуванням виразу (7), система рівнянь (5) запишеться у вигляді такого різницевого рівняння

$$\begin{aligned} \frac{1}{T}(\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1}) &= F(\hat{X}_{k-1}) + Bu_{k-1} \Rightarrow \hat{X}_k - \hat{X}_{k-1} = TF(\hat{X}_{k-1}) + TBu_{k-1} \Rightarrow \\ \hat{X}_k &= \hat{X}_{k-1} + TF(\hat{X}_{k-1}) + TBu_{k-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді система рівнянь (5), (2) у різностях набуде вигляду

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k-1} + TF(\hat{X}_{k-1}) + TBu_{k-1} = D(\hat{X}_{k-1}), \quad (9)$$

$$\hat{y}_{k-1} = C\hat{X}_{k-1} = h(\hat{X}_{k-1}). \quad (10)$$

Тут вектор-функції D і h є функціями векторної змінної \hat{X} і мають такий вигляд

$$D(\hat{X}) = \begin{pmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \\ d_{51} \\ d_{61} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 - Ta_{11})\hat{I}_{rd} + Ta_{13}\hat{\Psi}_{sd} - Ta_{14}\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sq} - Tb_{13}U_{sd}(\hat{\gamma}) + Tb_{11}U_{rd} \\ (1 - Ta_{22})\hat{I}_{rq} + Ta_{23}\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sd} + Ta_{24}\hat{\Psi}_{sq} - Tb_{24}U_{sq}(\hat{\gamma}) + Tb_{22}U_{rq} \\ Ta_{31}\hat{I}_{rd} + (1 - Ta_{33})\hat{\Psi}_{sd} + T\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sq} + Tb_{33}U_{sd}(\hat{\gamma}) \\ Ta_{42}\hat{I}_{rq} - T\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sd} + (1 - Ta_{44})\hat{\Psi}_{sq} + Tb_{44}U_{sq}(\hat{\gamma}) \\ \hat{\omega}_e \\ T\hat{\omega}_e + \hat{\gamma} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$h(\hat{X}) = \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Для подальших обчислень знадобляться матриці Якобі вектор-функцій $D(\hat{X})$ і $h(\hat{X})$. Ці матриці складаються з часткових похідних і мають вигляд:

$$J(\hat{X}) = \frac{\partial D(\hat{X})}{\partial \hat{X}} = \begin{pmatrix} \partial d_{11}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial d_{11}/\partial \hat{x}_{61} \\ \dots & \dots & \dots \\ \partial d_{61}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial d_{61}/\partial \hat{x}_{61} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$H = \frac{\partial h(\hat{X})}{\partial \hat{X}} = \begin{pmatrix} \partial h_{11}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial h_{11}/\partial \hat{x}_{61} \\ \partial h_{21}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial h_{21}/\partial \hat{x}_{61} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Знайдемо матриці Якобі для виразів (11) і (12). Для цього врахуємо співвідношення

$$\frac{\partial U_{sd}}{\partial \gamma} = U_{sq}; \quad \frac{\partial U_{sq}}{\partial \gamma} = -U_{sd}, \quad (15)$$

які випливають з диференціювання формул (4). Тоді матриці Якобі будуть

$$J(\hat{X}) = \begin{pmatrix} 1 - Ta_{11} & 0 & Ta_{13} & -Ta_{14}\hat{\omega}_e & -Ta_{14}\hat{\Psi}_{sq} & -Tb_{13}U_{sq}(\hat{\gamma}) \\ 0 & 1 - Ta_{22} & Ta_{23}\hat{\omega}_e & Ta_{24} & Ta_{23}\hat{\Psi}_{sd} & Tb_{24}U_{sd}(\hat{\gamma}) \\ Ta_{31} & 0 & 1 - Ta_{33} & T\hat{\omega}_e & T\hat{\Psi}_{sq} & Tb_{33}U_{sq}(\hat{\gamma}) \\ 0 & Ta_{42} & -T\hat{\omega}_e & 1 - Ta_{44} & -T\hat{\Psi}_{sd} & Tb_{44}U_{sd}(\hat{\gamma}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

В алгоритмі фільтра Калмана використовуються ще дві матриці: Q – коваріаційна матриця випадкових впливів на об'єкт; R – коваріаційна матриця випадкового шуму вимірів. Якщо всі координати вектора \hat{X} незалежні, то математичні сподівання їх змішаних добутоків нульові й матриця коваріації запишеться в такому вигляді

$$Q = \text{cov}(r) = \text{diag}(\sigma_{rid}^2 \quad \sigma_{riq}^2 \quad \sigma_{r\psi d}^2 \quad \sigma_{r\psi q}^2 \quad \sigma_{r\omega}^2 \quad \sigma_{r\gamma}^2), \quad (18)$$

де по головній діагоналі записані дисперсії змінних стану.

Матриця коваріації шуму вимірів запишеться так

$$R = \text{cov}(\rho) = M(\rho \rho^T) = \sigma_\rho^2 E, \quad (19)$$

де σ_ρ^2 – дисперсія струмів ротора ρ_{id}, ρ_{iq} ; E – одинична матриця.

Основним в алгоритмі спостерігача Калмана є знаходження матриці коефіцієнтів адаптації K . Алгоритм спостерігача Калмана на кожному інтервалі дискретизації за часом виконує такі властиві йому обчислення:

$$\tilde{X}_k = D(\hat{X}_{k-1}), \quad (20)$$

$$\tilde{P}_k = J P_{k-1} J^T + Q, \quad (21)$$

$$K_k = \tilde{P}_k H^T (H \tilde{P}_k H^T + R)^{-1}, \quad (22)$$

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k (y_k - H \tilde{X}_k), \quad (23)$$

$$P_k = (E - K_k H) \tilde{P}_k. \quad (24)$$

Величини \hat{X}_k і P_k , використовуються в наступному циклі розрахунку. Результатом описаного рекурсивного процесу є оцінка вектора стану МПЖ, що отримується на кожному циклі роботи програми

$$\hat{X}_k = (\hat{I}_{rd} \quad \hat{I}_{rq} \quad \hat{\Psi}_{sd} \quad \hat{\Psi}_{sq} \quad \hat{\omega}_e \quad \hat{\gamma}). \quad (25)$$

мережа живлення

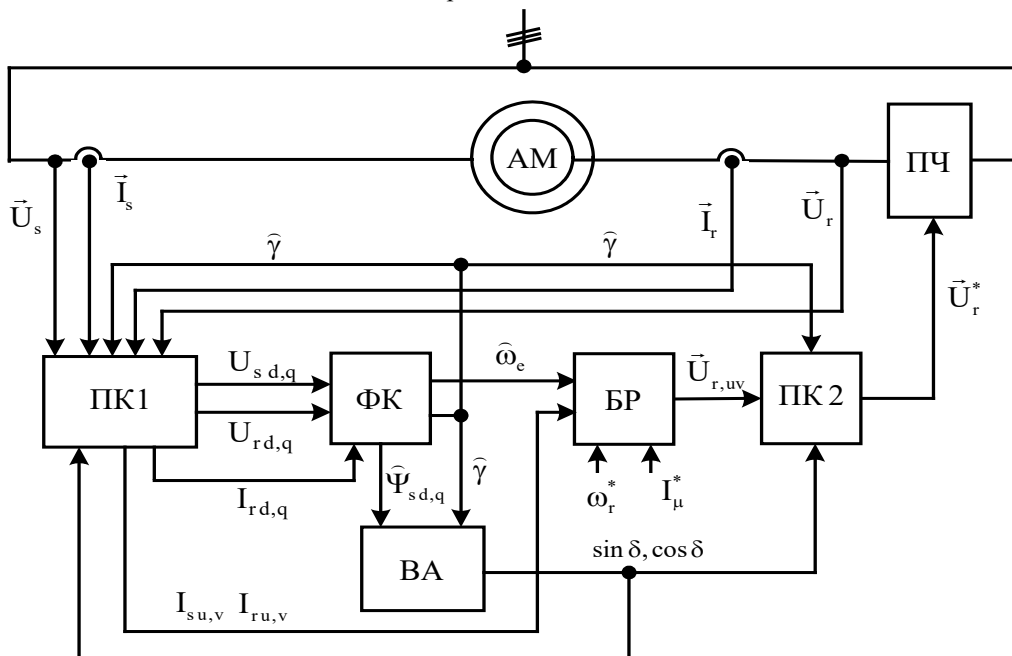


Рис. 1. Функціональна схема векторної системи керування МПЖ:

АМ – асинхронна машина; ПЧ – перетворювач частоти; ПК1, ПК2 – перетворювачі координат; ВА – векторний аналізатор; ФК – фільтр Калмана; БР – блок регуляторів

Проекції опорного вектора визначають на осі однієї з відомих ортогональних систем координат. У розроблювальній системі керування МПЖ фільтр Калмана обчислює кут

повороту ротора відносно статора, кутову швидкість ротора в ел. рад/с і проєкції вектора потокозчеплення статора на осі d, q . На рис. 1 зображена функціональна схема бездатчикової векторної системи керування МПЖ із фільтром Калмана в її складі. Транзисторний перетворювач частоти ПЧ включений у коло ротора АМ. Вимірюються тільки струми і напруги статорного і роторного ланцюгів АМ. У системі керування відсутні датчики кута повороту ротора, його швидкості та потокозчеплення – замість них використовується спостерігач Калмана, який обчислює ці величини.

Вхідні напруги для фільтра Калмана ФК обчислюються у блоці перетворювача координат ПК1. Ці обчислення містять вирази (4) і такі:

$$U_{s\alpha} = U_{sA}, U_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{sB} - U_{sC}); \quad I_{s\alpha} = I_{sA}, I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{sB} - I_{sC}); \quad (26)$$

$$U_{rd} = U_{ra}, \quad U_{rq} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{rb} - U_{rc}); \quad I_{rd} = I_{ra}, \quad I_{rq} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{rb} - I_{rc}); \quad (27)$$

Оцінки проєкцій $\hat{\Psi}_{sd}, \hat{\Psi}_{sq}$ з виходу ФК надходять у векторний аналізатор ВА для визначення проєкцій вектора $\vec{\Psi}_s$ на осі α, β за формулами:

$$\hat{\Psi}_{s\alpha} = \hat{\Psi}_{sd} \cos \hat{\gamma} - \hat{\Psi}_{sq} \sin \hat{\gamma}, \quad \hat{\Psi}_{s\beta} = \hat{\Psi}_{sd} \sin \hat{\gamma} + \hat{\Psi}_{sq} \cos \hat{\gamma}. \quad (28)$$

У блоці ВА для визначення напрямних синуса і косинуса використовуються проєкції $\hat{\Psi}_{s\alpha, \beta}$:

$$\hat{\Psi}_s = \sqrt{\hat{\Psi}_{s\alpha}^2 + \hat{\Psi}_{s\beta}^2}, \quad \sin \delta = \hat{\Psi}_{s\beta} / \hat{\Psi}_s, \quad \cos \delta = \hat{\Psi}_{s\alpha} / \hat{\Psi}_s. \quad (29)$$

У блоці ПК1 напрямні синус і косинус використовують для проведення розрахунків:

$$I_{su} = I_{s\alpha} \cos \delta + I_{s\beta} \sin \delta, \quad I_{sv} = I_{s\beta} \cos \delta - I_{s\alpha} \sin \delta, \quad (30)$$

і переведення струмів ротора в осі u, v :

$$I_{r\alpha} = I_{rd} \cos \hat{\gamma} - I_{rq} \sin \hat{\gamma}, \quad I_{r\beta} = I_{rd} \sin \hat{\gamma} + I_{rq} \cos \hat{\gamma}; \quad (31)$$

$$I_{ru} = I_{r\alpha} \cos \delta + I_{r\beta} \sin \delta, \quad I_{rv} = I_{r\beta} \cos \delta - I_{r\alpha} \sin \delta. \quad (32)$$

Алгоритм обчислень блоку фільтра Калмана ФК реалізує алгоритм обчислень на кожному кроці дискретизації перехідних процесів відповідно до формул (20)-(24) з використанням матриць (11), (12), а також (16), (17). Проєкції вектора напруги ротора $U_{rd, q}$ є вхідними впливами для ФК, а проєкції вектора напруги статора $U_{sd, q}$ представляють внутрішні змінні спостерігача ФК. Для прив'язки ФК до об'єкта керування і додання йому асимптотичної стійкості як вимірюваний вектор y_k у формулі (23) використовуються проєкції вектора струму ротора $I_{rd, q}$, на процес виміру яких накладається випадковий гауссівський шум з коваріаційною матрицею R (19).

Алгоритми релейного керування змінними стану МПЖ реалізуються у блоці регуляторів БР. Номінальне значення струму намагнічування стабілізується у каналі реактивної потужності релейним регулятором із таким законом керування

$$U_{ru} = U_m \text{sign} [I_{\mu}^* - I_{su} - I_{ru}] = U_m \text{sign} [I_{\mu}^* - I_{\mu}], \quad (33)$$

де $I_{\mu} = I_{su} + I_{ru}$ – струм намагнічування; $I_{\mu}^* = I_{\mu m} = \Psi_{sn} / L_m$ – номінальне значення струму намагнічування; $\Psi_{sn} = U_m / \omega_0$ – номінальне значення модуля вектора потокозчеплення статора; U_m – амплітуда фазної напруги ротора; ω_0 – кругова частота мережі.

Регулятор активної складової струму ротора в каналі активної потужності підпорядкований зовнішньому регулятору кутової швидкості ротора. Закон керування релейного регулятора струму

$$U_{rv} = U_m \text{sign}[U_{\omega}^* - I_{rv}]. \quad (34)$$

Релейний регулятор кутової швидкості ротора описується таким виразом

$$U_{\omega}^* = -I_{rv}^* \text{sign}[\omega_r^* - \hat{\omega}_r + \gamma I_{rv}], \quad (35)$$

де $I_{rv}^* = 2I_{rvn} = \frac{4M_n}{3N\Psi_{sn}}$ – рівень обмеження активної складової струму ротора; $\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_e/N$ –

сигнал оцінки швидкості ротора в геометричних рад/с, що обчислюється ФК; $\gamma = 3\Delta N\Psi_{sn}/(2J)$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за активною складовою струму ротора.

В усіх регуляторах використовуються сигнали зворотних зв'язків за фактичними струмами ротора і сигнал зворотного зв'язку за оцінкою швидкості ротора, обчисленої спостерігачем Калмана. Керуючі впливи зі спрямованої за вектором потокозчеплення статора ортогональної обертової системи координат переводяться в перетворювачі координат ПК2 в зв'язані з ротором фазні осі координат за такими виразами:

$$U_{r\alpha} = U_{ru} \cos \delta - U_{rv} \sin \delta; \quad U_{r\beta} = U_{ru} \sin \delta + U_{rv} \cos \delta, \quad (36)$$

$$U_{rd} = U_{r\alpha} \cos \hat{\gamma} + U_{r\beta} \sin \hat{\gamma}; \quad U_{rq} = U_{r\beta} \cos \hat{\gamma} - U_{r\alpha} \sin \hat{\gamma}, \quad (37)$$

$$U_a^* = U_{rd}; \quad U_b^* = -\frac{U_{rd}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{rq}; \quad U_c^* = -\frac{U_{rd}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{rq}. \quad (38)$$

Релейно-векторна система керування МПЖ орієнтована за вектором потокозчеплення статора і складається з двох каналів керування. У каналі активної потужності регулятор активної складової струму ротора (34) підпорядкований зовнішньому регулятору кутової швидкості ротора МПЖ (35). Швидкість стабілізується на рівні, обумовленому потребами технологічного процесу. У каналі реактивної потужності працює один регулятор струму намагнічування (33), що стабілізує струм намагнічування на постійному рівні I_{μ}^* незалежно від режимів регулювання швидкості. При струмі $I_{\mu} = I_{\mu}^*$, що розраховується по зазначеній вище формулі, струми в обмотках статора МПЖ збігаються за фазою з напругами статора – фазове зрушення між струмами і напругами обмоток статора відсутнє, статорний струм цілком активний і коефіцієнт потужності статора МПЖ дорівнює одиниці. При цьому збудження МПЖ відбувається реактивним струмом ротора.

У математичному середовищі Matlab написана програма розв'язання рівнянь МПЖ у фазних осях разом із системою керування, що включає в себе алгоритми керування релейних регуляторів і матриці координатних перетворень у прямому каналі й у колі зворотного зв'язку, у яке включений ФК. Використовувалася АМ з такими технічними даними: $P_n = 14 \text{ кВт}$, $U_{лн} = 380 \text{ В}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $U_2 = 300 \text{ В}$. При моделюванні приймалося, що струми і напруги статора і ротора вимірюються без перешкод. При цьому ФК показав ефективну роботу, можливість якої при релейному керуванні обґрунтована в статті [10]. Однак матриця R приймалася відмінною від нуля і рівною $R = \text{diag}[\sigma_{rd}^2, \sigma_{rq}^2] = \text{dig}[1.8^2, 1.8^2]$. Елементи матриці Якобі J розраховуються і тим самим оновлюються на кожному інтервалі дискретизації за часом досліджуваних перехідних процесів. Матриця Q підбиралася в процесі моделювання і прийнята такою

$$Q = \text{diag}(\sigma_{rd}^2, \sigma_{rq}^2, \sigma_{r\psi d}^2, \sigma_{r\psi q}^2, \sigma_{r\omega}^2, \sigma_{r\gamma}^2) = \text{diag}(16 \cdot 10^{-4}, 16 \cdot 10^{-4}, 4 \cdot 10^{-8}, 4 \cdot 10^{-8}, 10^{-2}, 9 \cdot 10^{-8}). \quad (39)$$

На рис. 2 представлений алгоритм програми дослідження динаміки МПЖ з бездатчиковою релейно-векторною системою керування, побудованою на основі розширеного фільтра Калмана.

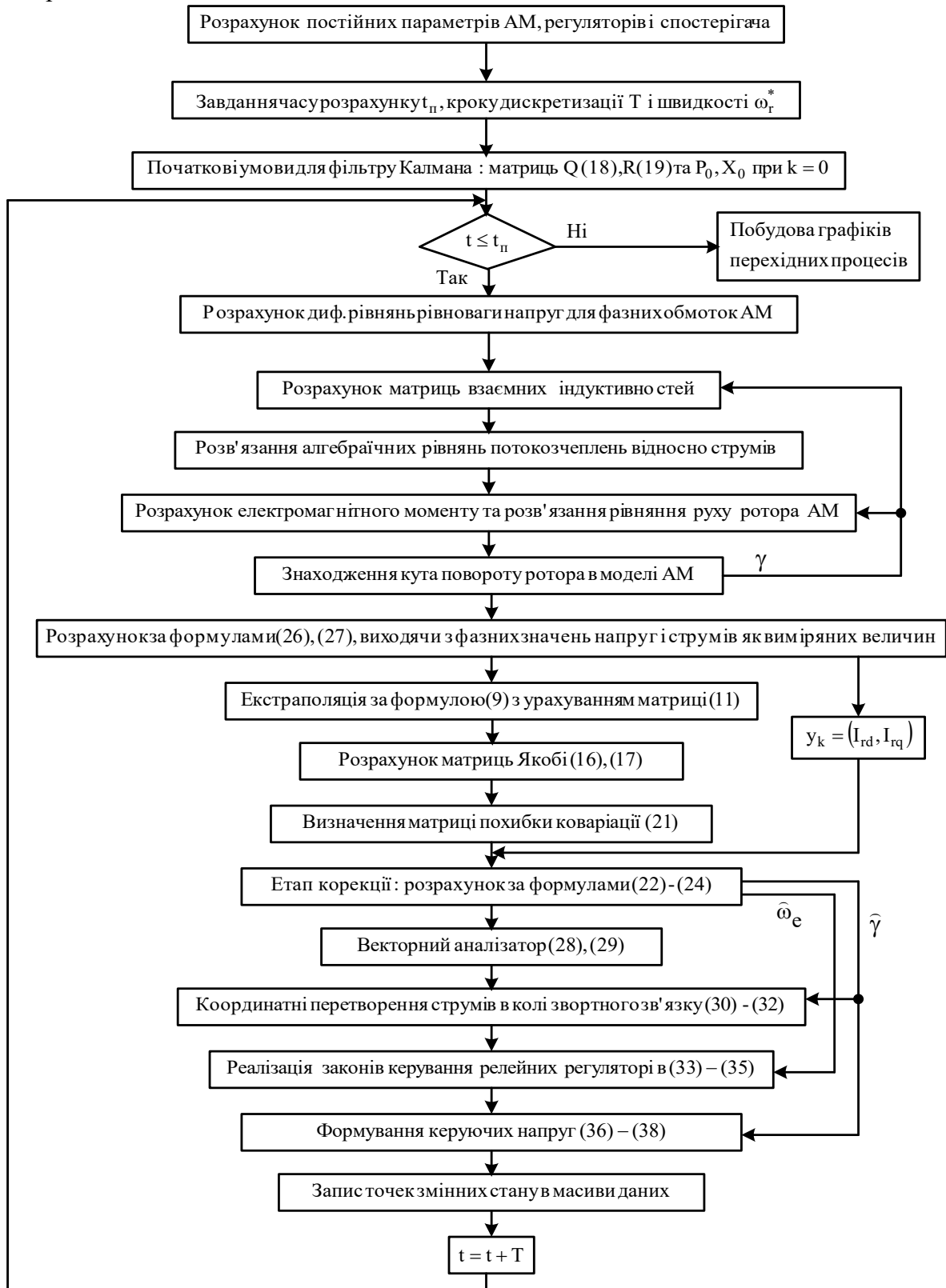


Рис. 2. Алгоритм програми дослідження динаміки МПЖ з бездатчиковою релейно-векторною системою керування

Рівняння АМ з фазним ротором записані у матричній формі у фазних осях координат. Розв'язання рівнянь моделі АМ також записувалися з використанням матриць та векторів параметрів та змінних. Усі обчислення виконуються в одному циклі, у якому на кожному кроці чисельного інтегрування диференціальних рівнянь застосований метод Ейлера, а для одночасного розв'язання підсистем алгебраїчних рівнянь знаходилася зворотна матриця. Етапи екстраполяції та корекції алгоритму спостерігача Калмана на кожному кроці дискретизації за часом T також розраховувалися матричними формулами, що представлені у статті.

На рис. 3 і 4 представлені графіки перехідних процесів у МПЖ із релейно-векторною системою керування і ФК у колі зворотного зв'язку для ідентифікації опорного вектора потокозчеплення статора, кутової швидкості ротора і кута його повороту. На вказаних рисунках синіми лініями показані змінні стану, а червоними – їх оцінені значення, визначені ФК. На рис. 3 спершу відбувається збудження МПЖ підключенням статора до мережі при нерухомому роторі. Після вгасання коливань вектора потокозчеплення статора починається розгін до номінальної швидкості без моменту навантаження. Потім прикладається навантаження з наступним уповільненням до зниженої швидкості. Щоб уникнути коливань вектора потокозчеплення статора при збудженні МПЖ можливо створювати магнітний потік струмами ротора при замкненому статорі, що показано на рис. 4. Далі подається сигнал завдання в канал регулювання швидкості і починається пуск при живленні ротора від перетворювача частоти при замкнених обмотках статора. Бездатчикова система керування з ФК працює таким чином, що при пуску з замкненим статором модуль потокозчеплення статора збільшується на час пуску й повертається до номінального рівня при досягненні швидкістю сталого значення. Коли ротор обертається з номінальною швидкістю здійснюється підключення статора до мережі. Це не позначається на якості керування швидкістю і практично не змінює сталі значення потокозчеплення. Функція перемикання релейного регулятора швидкості (35) з жорсткими зворотними зв'язками й не містить інтегральної складової. Тому система регулювання швидкості статична за збурюючим впливом, що підвищує запас стійкості системи та припустимо для електроприводів не потребуючих значного діапазону регулювання швидкості.

Кут повороту визначений спостерігачем Калмана прирівнюється нулю через кожні 2π радіан. Завдяки значній точності ідентифікації графіки кута повороту ротора і його оцінки практично збігаються. На рис. 3 і 4 показані значення кута і його оцінки на тих ділянках перехідного процесу, де їх незначні розбіжності помітні. Коли до вала двигуна не прикладений момент навантаження струм в обмотках статора відсутній. Він показаний синьою лінією на останніх діаграмах рис. 3 і 4. При додаванні навантаження струм в обмотках статора з'являється і збігається за фазою з напругами статора. У такому випадку струм статора цілком активний і досягає свого мінімального значення. Тому канал регулювання реактивної потужності зі стабілізацією струму намагнічування можна вважати контуром екстремального регулювання за критерієм мінімуму струму статора.

Висновки. У роботі досліджувалася динаміка машини подвійного живлення із системою керування, яка використовує фільтр Калмана, в алгоритмі ідентифікації якого застосовується нова структура і параметри матриці Якобі, що обумовлено розглядом проєкцій вектора напруги статора не як незалежних входних впливів, а як внутрішніх змінних стану, які залежать від кута повороту ротора. Це привело до нової форми запису моделі ФК і його матриць Якобі. Спостерігач містить часткові похідні проєкцій вектора напруги статора за кутом повороту ротора, які вносять випередження в процес ідентифікації координат фільтром Калмана, що дозволило уникнути автоколивань у системі керування, які виникали при використанні стандартного підходу, коли напруги статора розглядаються як зовнішні впливи. Математичне моделювання підтверджує відсутність автоколивань, а також асимптотичну стійкість алгоритму спостереження запропонованим ФК як електромагнітних, так і механічних координат МПЖ, що забезпечує відсутність статичної помилки ідентифікації швидкості, як змінної, що приймає усталене значення.

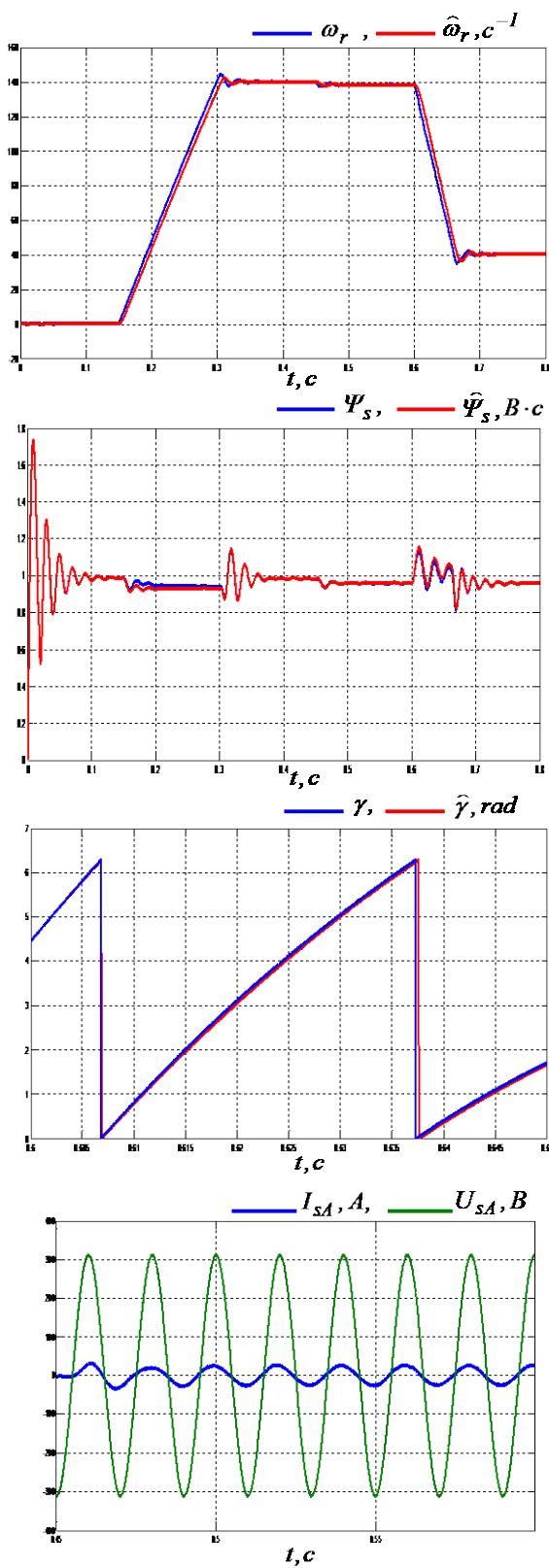


Рис. 3. Змінні стану МПДЖ та їх оцінки розраховані фільтром Калмана при пуску зі статором підключеним до мережі

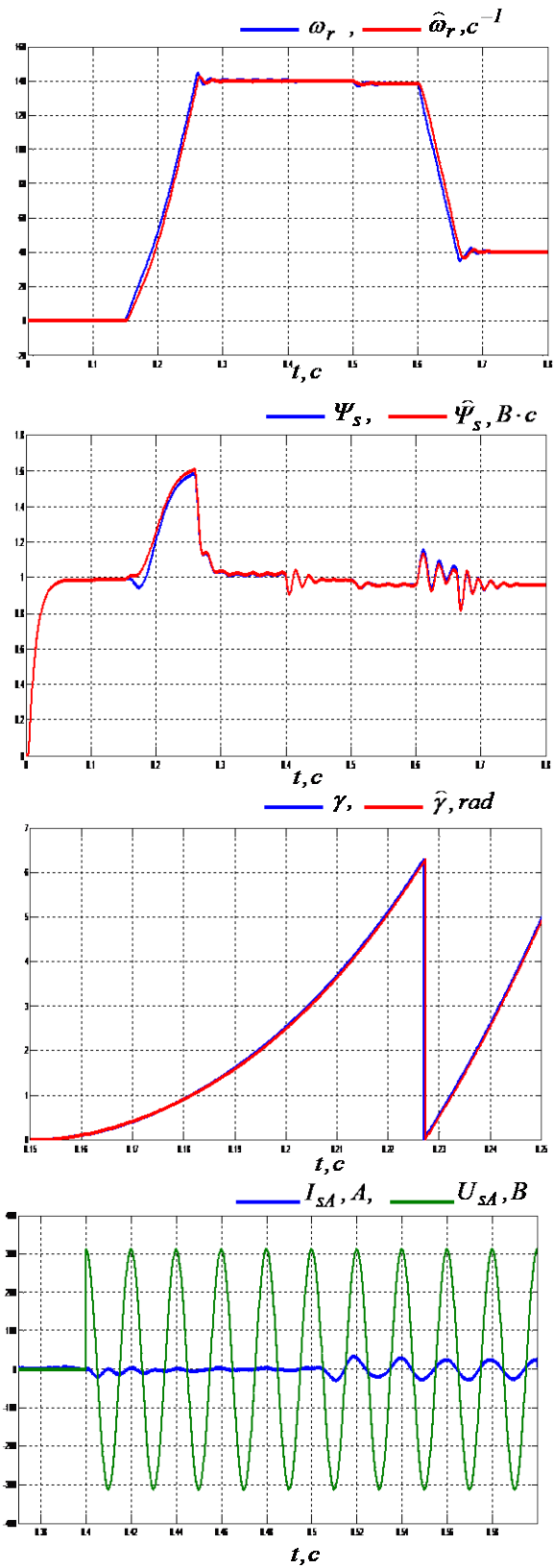


Рис. 4. Змінні стану МПДЖ та їх оцінки розраховані фільтром Калмана при пуску с замкненими обмотками статора

Список використаних джерел

1. Ключев, О. В. Використання фільтра Калмана як спостерігача стану у векторній системі керування асинхронною машиною / О. В. Ключев, О. В. Садовой, С. А. Сергієнко, Ю. В. Сохіна // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2022. – № 5(136). – С. 27-35. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.5.3>
2. Kalman Filter as Part of a Relay-Vector System Control of Asynchronous Electric Drive / O. Kliuiev, O. Sadovoi, Yu. Sokhina, S. Serhiienko // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine. – 2023. – Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402448>.
3. Abdelrahem, M. Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems / M. Abdelrahem, C. Hackl, R. Kennel // International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). – 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177628>.
4. Riccio, J. Odhano Zanchetta Sensorless and Modulated Model-Predictive Control for a Doubly Fed Induction Machine / J. Riccio, S. Odhano, P. Zanchetta // 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe). – 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/EPE.2019.8915159>.
5. Ricardo Perez I. Experimental sensorless vector control performance of a DFIG based on an extended Kalman filter / I. Ricardo Perez, J. Cesar Silva, E. Juan Yuz, R. Gonzalo Carrasco // 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2012). – 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6388930>.
6. Lazreg, M. H. Sensorless Speed Control of Double Star Induction Machine With Five Level DTC Exploiting Neural Network and Extended Kalman Filter / M. H. Lazreg, A. Bentaallah // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2019. – Vol.15, № 1. – Pp. 142-150.
7. Chaal Hamza. Improved direct torque control using Kalman filter: application to a doubly-fed machine / Chaal Hamza, Jovanovic Milutin // 11th IASTED International Conference on Control and Applications (CA 2009), 13-15 July 2009, Cambridge, UK. – 2009.
8. Beghdadi, M. A novel sensorless fully synergetic control of the brushless doubly-fed induction machine integrated in a wind-energy conversion system with a fuzzy-based HCS MPPT algorithm and an extended Kalman filter / M. Beghdadi, K. Kouzi // Elektrotehniski Vestnik: Ljubljana. – 2022. – Vol. 89, Issue 4. – Pp. 169-180.
9. Дослідження векторної системи керування машиною подвійного живлення з фільтром Калмана у контурі зворотного зв'язку / О. В. Ключев, О. В. Садовой, С. А. Сергієнко, Ю. В. Сохіна // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2024. – № 1 (144). – С. 234-243. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.31>.
10. Статистичний аналіз струму асинхронної машини з релейно-векторною системою керування / О. В. Ключев, О. В. Садовой, Ю. В. Сохіна, Ю. О. Жидко // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2024. – № 1(44). – С. 99-108. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.12>

References

1. Kliuiev, O.V., Sadovoi, O.V., Serhiienko, S.A., & Sokhina, Yu.V. (2022). Vykorystannia filtra Kalmana yak sposterihacha stanu u vektornii systemi keruvannia asynkhronnoiu mashynoiu [Using the Kalman filter as a state observer in a vector control system of an asynchronous machine]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, 5(136), 27-35. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.5.3>.
2. Kliuiev, O., Sadovoi, O., Sokhina, Yu., & Serhiienko S. (2023). Kalman Filter as Part of a Relay-Vector System Control of Asynchronous Electric Drive. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp.1–5). <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402448>.
3. Abdelrahem, M., Hackl, C., & Kennel, R. (2015). Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177628>.
4. Riccio, J., Odhano, S., & Zanchetta, P. (2019). Sensorless and Modulated Model-Predictive Control for a Doubly Fed Induction Machine. *21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*. <http://dx.doi.org/10.23919/EPE.2019.8915159>.
5. Ricardo Perez, I., Cesar Silva, J., Juan Yuz, E., & Gonzalo Carrasco, R. (2012). Experimental sensorless vector control performance of a DFIG based on an extended Kalman filter. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6388930>.

6. Lazreg, M. H., & Bentaallah, A. (2019). Sensorless Speed Control of Double Star Induction Machine With Five Level DTC Exploiting Neural Network and Extended Kalman Filter. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 15(1), 142-150.

7. Chaal Hamza, & Jovanovic Milutin (13-15 July 2009). Improved direct torque control using Kalman filter: application to a doubly-fed machine. *11th IASTED International Conference on Control and Applications (CA 2009)*. Cambridge, UK.

8. Beghdadi, M., & Kouzi, K. (2022). A novel sensorless fully synergetic control of the brushless doubly-fed induction machine integrated in a wind-energy conversion system with a fuzzy-based HCS MPPT algorithm and an extended Kalman filter. *Elektrotehniski Vestnik: Ljubljana*, 89(4), 169-180.

9. Kliuiev, O.V., Sadovoi, O.V., Serhienko, S.A., & Sokhina, Yu.V. (2024). Doslidzhennia vektornoï systemy keruvannia mashynoiu podviinoho zhyvlennia z filtrom Kalmana u konturi zvorotnoho zv'iazku [Research of the vector control system of doubly fed machine with a Kalman filter in the feedback circuit]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho– Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, 1(144), 234-243. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.31>

10. Kliuiev, O.V., Sadovoi, O.V., Sokhina, Yu.V., & Zhydko, Yu.O. (2024). Statystychnyi analiz strumu asynkronnoi mashyny z releino-vektornoïu systemoiu keruvannia [Statistical analysis of asynchronous machine current with relay-vector control system]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsky state technical university (technical sciences)*, 1(44), 99-108. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.12>

Отримано 08.12.2024

UDC 62-83:681.513.5

Oleh Kliuiev¹, Oleksandr Sadovoi², Yuliya Sokhina³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate professor of the Department of Electrotechnical and electromechanical Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: kluev2006@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>. Scopus Author ID: [57217113986](https://orcid.org/57217113986)

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrotechnical and electromechanical Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: sadovoyav@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9739-3661>. Scopus Author ID: [57170694900](https://orcid.org/57170694900)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate professor of the Department of Electrotechnical and electromechanical Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: jvsokhina@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4329-5182>. Scopus Author ID: [57205445522](https://orcid.org/57205445522)

SENSORLESS CONTROL SYSTEM BY DOUBLY FED MACHINE ON BASED THE KALMAN FILTER

Modern sensorless asynchronous electric drive systems for stator control widely use Kalman filters as observers of coordinates, parameters and disturbing influences. For doubly fed machines where control actions are formed in the rotor circuit when the stator is directly connected to the power supply network, the problem of vector control is complicated by the need to identify not only the reference vector of the flux linkage and the angular speed of the rotor of the asynchronous machine but also the angle rotation of the rotor relative to the stator. If we integrate the speed estimation signal from the observer's output, then the regulation process will be self-oscillating. Therefore, in the paper, the rotor rotation angle equation is included in the Kalman observer model. In this case only the control voltages of the rotor circuit are accepted as input influences of the observer, and the projections of the unregulated stator voltage vector are included in the state matrix of the Kalman observer as quantities that functionally depend on the angle of rotation of the rotor. This approach made it possible to synthesize a Kalman observer in which there are no self-oscillations in the process of speed control and the control system maintains asymptotic stability at various levels of speed stabilization. The Kalman filter implemented as a computer program on a microcontroller has insignificant inertia, does not introduce a phase shift into feedback signals, and with the correct choice of its parameters and structure has virtually no effect on the dynamics of the control system. The control system provides a good decomposition of the asynchronous machine into two control channels, and the Kalman filter, when implementing direct relay control in the active and reactive power channels, ensures high accuracy and stability of the process of identifying the coordinates of the electric drive, regardless of whether there are random noises in the measured currents and voltages.

Keywords: doubly fed machine; sensorless vector control; relay controller; coordinate identification; Kalman filter.

Fig.:4. References: 10.