

ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРА КАЛМАНА ЯК СПОСТЕРІГАЧА СТАНУ У ВЕКТОРНІЙ СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННОЮ МАШИНОЮ

Олег Ключев

кандидат технічних наук, доцент,

Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, Україна, 51900,
kluev2006@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4542-3317

Олександр Садовой

доктор технічних наук, професор,

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро,
Україна, 49005, sadovoyav@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9739-3661

Сергій Сергієнко

кандидат технічних наук, доцент,

Кременчуцький національний технічний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева,
20, Кременчук, Україна, 39600, serhiy.serhiyenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3977-5239

Юлія Сохіна

кандидат технічних наук, доцент,

Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, Україна, 51900,
jvsokhina@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4329-5182

Для підвищення точності регулювання швидкості в асинхронному бездатчиковому електроприводі розроблений алгоритм дискретного розширеного фільтра Калмана у складі релейно-векторної системи керування з метою ідентифікації швидкості та вектора потокозчеплення ротора асинхронної машини. Досліджено динаміку системи керування за спільної роботи релейних регуляторів вбудованим до її складу алгоритмом цифрового фільтра Калмана для ідентифікації в реальному часі змінних стану асинхронної машини. На відміну від спостерігачів, структура яких визначається за допомогою другої теореми Ляпунова про стійкість руху в разі замикання зворотного зв'язку через фільтр Калмана, у релейно-векторній системі керування відсутня статична помилка регулювання швидкості. Астатизм регулювання швидкості запропонованої векторної бездатчикової системи керування з урахуванням випадкових помилок вимірювання струмів статора підтверджується методом математичного моделювання.

Ключові слова: асинхронний електропривод, змінні стану, цифрова фільтрація, фільтр Калмана, швидкість ротора, вектор потокозчеплення, моделювання.

Актуальність роботи. Основними труднощами в побудові систем векторного керування асинхронними машинами (далі – АМ) є одержання поточної інформації про опорний вектор потокозчеплення. Використання датчиків індукції магнітного поля в повітряному зазорі машини на базі елементів Холу дозволяє системі керування одержувати достовірну інформацію про вектор потокозчеплення. Однак це спричиняє зміну конструкції двигуна, його технологічне ускладнення, отже, подорожчання. Нині також прагнуть відмовитися від фізичного датчика швидкості,

що збільшує надійність і зменшує вартість електропривода (далі – ЕП).

Завдання бездатчикового керування вирішують методами динамічної ідентифікації, які дозволяють визначати в реальному часі поточні значення вектора стану АМ. У статтях [1; 2] синтезовані спостерігачі швидкості та потокозчеплення на підставі другої теореми Ляпунова про стійкість руху у векторних системах керування асинхронними електроприводами за ротором і статором. Однак унаслідок уведення в контур керування швидкістю обертання елек-

тропривода зворотних зв'язків за змінними стану ЕП від запропонованих спостерігачів у системі керування виникає статична помилка стабілізації швидкості за зміни моменту навантаження на валу ротора АМ, що видно із графіків перехідних процесів, представлених у зазначених роботах. Більш доцільним є застосування для ідентифікації методів оцінювання, заснованих на реєстрації обмірюваних величин за дії випадкових перешкод і подальшої їхньої статистичної обробки. У статті запропонований спостерігач на основі алгоритму фільтра Калмана, який істотно відрізняється від алгоритмів раніше синтезованих авторами статті спостерігачів і не створює, як з'ясувалося під час проведених досліджень, у системі керування статизму за швидкістю.

Алгоритм калмановської фільтрації широко використовується для динамічної ідентифікації координат і параметрів різних типів електроприводів [3]. У статті [4] застосовується фільтр Калмана для ідентифікації швидкості за різних налаштувань її регулятора в електроприводах постійного струму, а в роботі [5] здійснюється ідентифікація активного опору роторної обмотки асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. У [6] представлений метод оцінювання ідентифікатором Калмана в реальному часі параметрів асинхронного електропривода та визначення його параметричної робастності з векторною бездавачевою системою керування. Фільтр Калмана успішно застосовується для ідентифікації швидкості в електроприводах із пружними механічними зв'язками [7]. У роботі [8] проводиться порівняльний аналіз полеорієнтованих систем керування АМ з ідентифікаторами стану на основі фільтра Калмана та спостерігачів із ковзним режимом і Люенбергера. Узагальнюються переваги та недоліки кожного типу спостерігачів. У [9] фільтр Калмана використовується для ідентифікації швидкості у двоканальній системі керування, яка містить три лінійні регулятори. Причому в каналі реактивної потужності стабілізується реактивний струм статора та не регулюється потокозчеплення. У [10] порівнюються стандартний і розширений фільтри Калмана для оцінки тільки вектора потокозчеплення ротора за наявності фізичного датчика швидкості. В [11] досліджується розширений фільтр Калмана, у якому матриця коваріації шуму вимірів або постійна, або ця матриця оновлюється на кожному інтервалі дискретного часу. У [12] за допомогою фільтра Калмана оцінюється, окрім швидкості, ще й потужність на валу електропри-

вода насоса для розрахунку напору та витрати з використанням стаціонарних характеристик насоса. У [13] досліджується фільтр Калмана під час оцінювання швидкості й електромагнітного моменту як у сталому режимі, так і під час різких змін вхідної напруги АМ. У багатьох умовах експлуатації напруга статора не змінюється, тому в [14] для оцінки параметрів АМ використовується фільтр Калмана з виміром тільки струмів статора. На можливість застосування розширеного фільтра Калмана для оцінки параметрів АМ вказується в роботі [15].

У результаті проведеного аналізу літературних джерел не знайдено робіт, у яких би досліджувався фільтр Калмана разом із релейними регуляторами струмів і потокозчеплення ротора у складі векторної системи керування асинхронним електроприводом.

У статті ставиться завдання синтезу спостерігача швидкості та потокозчеплення ротора на основі алгоритму фільтра Калмана з метою підвищення точності ідентифікації та регулювання змінних стану в асинхронному електроприводі з релейно-векторним керуванням.

Матеріал і результати досліджень. В основу спостерігача покладена модель, рівняння якої збігаються з рівняннями, що описують об'єкт:

$$\begin{aligned} p\hat{X} &= A\hat{X} + Bu; \\ \hat{y} &= C\hat{X}, \end{aligned} \quad (1)$$

де u – відомий вектор вхідних впливів; A , B – матриці стану та входу; C – матриця виходу; \hat{X} – оцінка невідомого вектора стану об'єкта; y – вектор вимірюваних вихідних величин.

Наближення координат моделі до реального об'єкта здійснюється за допомогою різниці обмірюваного вектора та його оцінки \hat{y} . Передбачається, якщо ця різниця нульова, то й оцінка вектора стану \hat{X} дорівнює його істинному значенню X .

Рівняння спостерігача виглядає так:

$$p\hat{X} = A\hat{X} + Bu + K(y - \hat{y}). \quad (2)$$

Фільтр Калмана являє собою адаптивний спостерігач, структура якого зображена на рис. 1. У структурній схемі r – вектор випадкових впливів на об'єкт; ρ – випадковий вектор шуму вимірів. Складові частини векторів r і ρ представляють нормально розподілені випадкові процеси з нульовим математичним сподіванням.

Основне питання полягає в тому, як в умовах випадкових перешкод і впливів на об'єкт (r і ρ) знайти матрицю адаптації K , складові частини

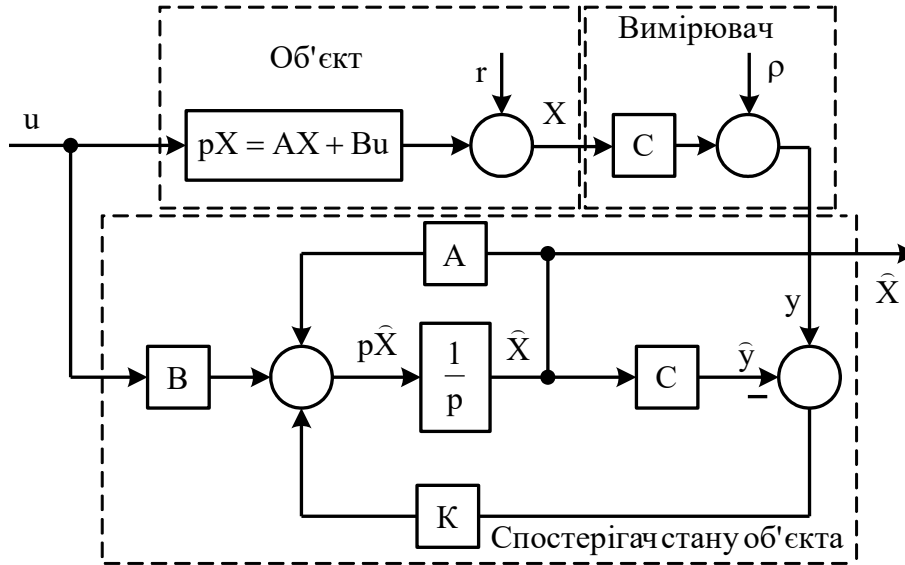


Рис. 1. Структура фільтра Калмана

якої оновлюються в реальному часі на кожному кроці перехідного процесу.

Рівняння електромагнітних процесів асинхронного двигуна в осях координат α, β узяті зі статті [2]. За постійної швидкості обертання ротора зазначену систему рівнянь можна доповнити п'ятим рівнянням і таким способом синтезувати розширений фільтр Калмана. Тоді система рівнянь у матричній формі має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{I}_{\alpha\alpha} \\ \hat{I}_{\beta\beta} \\ \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \\ \hat{\omega}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14}\hat{\omega}_e & 0 \\ 0 & -a_{22} & -a_{23}\hat{\omega}_e & a_{24} & 0 \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & -\hat{\omega}_e & 0 \\ 0 & a_{42} & \hat{\omega}_e & -a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{\alpha\alpha} \\ \hat{I}_{\beta\beta} \\ \hat{\Psi}_{r\alpha} \\ \hat{\Psi}_{r\beta} \\ \hat{\omega}_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{I}_{\alpha\alpha} \\ \hat{I}_{\beta\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{\alpha\alpha} & \hat{I}_{\beta\beta} & \hat{\Psi}_{r\alpha} & \hat{\Psi}_{r\beta} & \hat{\omega}_e \end{pmatrix}^T, \quad (4)$$

де коефіцієнти в системі рівнянь (3) дорівнюють [2]:

$$a_{11} = a_{22} = \frac{R'L_r}{\Delta}, \quad a_{23} = a_{14} = \frac{L_m}{\Delta}, \quad a_{13} = a_{24} = \frac{k_r R_r}{\Delta},$$

$$a_{31} = a_{42} = k_r R_r;$$

$$a_{33} = a_{44} = \frac{R_r}{L_r}, \quad b_{11} = b_{22} = \frac{L_r}{\Delta}, \quad \Delta = L_s L_r - L_m^2,$$

$$R' = R_s + k_r^2 R_r. \quad (5)$$

Під час побудови цифрових систем безперервні диференціальні рівняння замінюються різницевиими. У дискретному часі система рівнянь (3), (4) запишеться у вигляді таких різницевих рівнянь:

$$\frac{1}{T}(\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1}) = A\hat{X}_{k-1} + Bu_{k-1} \Rightarrow$$

$$\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1} = TA\hat{X}_{k-1} + TBu_{k-1},$$

$$\hat{X}_k = (TA + E)\hat{X}_{k-1} + TBu_{k-1} = F(\hat{X}_{k-1}); \quad (6)$$

$$\hat{y}_{k-1} = C\hat{X}_{k-1} = h(\hat{X}_{k-1}), \quad (7)$$

де T – період дискретизації за часом; E – одинична матриця.

Тут вектор-функції F і h є функціями векторної змінної \hat{X} і мають з урахуванням (3), (4) такий вигляд:

$$F(\hat{X}) = \begin{pmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \\ f_{41} \\ f_{51} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-Ta_{11})\hat{I}_{\alpha\alpha} + Ta_{13}\hat{\Psi}_{r\alpha} + Ta_{14}\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{r\beta} + Tb_{11}u_{\alpha} \\ (1-Ta_{22})\hat{I}_{\beta\beta} - Ta_{23}\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{r\alpha} + Ta_{24}\hat{\Psi}_{r\beta} + Tb_{22}u_{\beta} \\ Ta_{31}\hat{I}_{\alpha\alpha} + (1-Ta_{33})\hat{\Psi}_{r\alpha} - T\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{r\beta} \\ Ta_{42}\hat{I}_{\beta\beta} + T\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{r\alpha} + (1-Ta_{44})\hat{\Psi}_{r\beta} \\ \hat{\omega}_e \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$h(\hat{X}) = \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{I}_{\alpha\alpha} \\ \hat{I}_{\beta\beta} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Для алгоритму ідентифікації Калмана необхідні матриці Якобі векторів-функцій $F(\hat{X})$ і $h(\hat{X})$. Ці матриці мають вигляд:

$$J = \frac{\partial F(\hat{X})}{\partial \hat{X}} = \begin{pmatrix} 1-Ta_{11} & 0 & Ta_{13} & Ta_{14}\hat{\omega}_e & Ta_{14}\hat{\Psi}_{r\beta} \\ 0 & 1-Ta_{22} & -Ta_{23}\hat{\omega}_e & Ta_{24} & -Ta_{23}\hat{\Psi}_{r\alpha} \\ Ta_{31} & 0 & 1-Ta_{33} & -T\hat{\omega}_e & -T\hat{\Psi}_{r\beta} \\ 0 & Ta_{42} & T\hat{\omega}_e & 1-Ta_{44} & T\hat{\Psi}_{r\alpha} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$H = \frac{\partial h(\hat{X})}{\partial \hat{X}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

В алгоритмі фільтра використовуються ще дві матриці: Q – коваріаційна матриця випадкових впливів на об’єкт; R – коваріаційна матриця випадкового шуму вимірів.

Розглянемо коваріаційну матрицю випадкових впливів на об’єкт Q . Спершу визначають, які координати вектора стану двигуна вважати випадковими. Якщо вважати випадковими всі координати вектора X , то шум випадкових впливів на об’єкт визначається багатомірною випадковою величиною r такого вигляду:

$$r = (r_{i\alpha} \quad r_{i\beta} \quad r_{\psi\alpha} \quad r_{\psi\beta} \quad r_{\omega})^T. \quad (12)$$

Якщо припустити, що всі координати вектора r не корелюють, то математичні сподівання їх змішаних добутків будуть нульовими, матриця коваріації запишеться в такому вигляді:

$$Q = \text{cov}(r) = \text{diag}[\sigma_{r_{i\alpha}}^2 \quad \sigma_{r_{i\beta}}^2 \quad \sigma_{r_{\psi\alpha}}^2 \quad \sigma_{r_{\psi\beta}}^2 \quad \sigma_{r_{\omega}}^2], \quad (13)$$

де за головною діагоналлю записані дисперсії відповідних випадкових величин.

Коваріаційну матрицю R визначає шум вимірів, що характеризується багатомірною випадковою величиною ρ , яка в разі прив’язки до двох проєкцій вектора струму статора виглядає так:

$$\rho = (\rho_{i\alpha} \quad \rho_{i\beta})^T. \quad (14)$$

Елементи вектора (14) – це випадкові величини з нульовим математичним сподіванням. Матриця коваріації шуму вимірів запишеться так:

$$R = \text{cov}(\rho) = M(\rho\rho^T) = \text{diag}[\sigma_{\rho}^2 \quad \sigma_{\rho}^2], \quad (15)$$

де σ_{ρ}^2 – дисперсія випадкових величин $\rho_{i\alpha}$, $\rho_{i\beta}$.

Якщо є конкретна схема вузла вимірів струму, завжди можна оцінити середню помилку вимірів. Квадрат цієї середньої помилки і буде шуканою дисперсією σ_{ρ}^2 . Дисперсії матриці Q варто задавати не занадто великими, а остаточне уточнення значень дисперсій здійснюють під час налаштування фільтра.

Алгоритм обчислень, які виконуються фільтром у кожному програмному циклі, складається із двох етапів: екстраполяції та корекції. На етапі екстраполяції відбувається передбачення двох величин:

вектора стану системи за формулою:

$$\tilde{X}_k = F(\tilde{X}_{k-1}), \quad (16)$$

і матриці помилки коваріації за формулою:

$$\tilde{P}_k = J P_{k-1} J^T + Q. \quad (17)$$

На етапі корекції відбувається обчислення матриці K_k і коректування зроблених передбачень \tilde{X}_k , \tilde{P}_k .

Матриця K_k (її часто називають посиленням Калмана) обчислюється за такою формулою:

$$K_k = \tilde{P}_k H^T (H \tilde{P}_k H^T + R)^{-1}. \quad (18)$$

Коректування передбачення вектора стану системи здійснюється за формулою:

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k (y_k - H\tilde{X}_k), \quad (19)$$

де $y_k = (I_{s\alpha} \quad I_{s\beta})^T$ – обмірюваний струм статора в поточний момент часу, на k -му циклі.

Коректування передбачення матриці помилки коваріації здійснюється за формулою:

$$P_k = (E - K_k H) \tilde{P}_k. \quad (20)$$

Величини \hat{X}_k і P_k , обчислені на етапі корекції, використовуються в наступному програмному циклі для екстраполяції.

Результатом описаного рекурсивного процесу є розрахована на кожному циклі роботи програми оцінка вектора стану двигуна:

$$\hat{X}_k = (\hat{I}_{s\alpha} \quad \hat{I}_{s\beta} \quad \hat{\Psi}_{r\alpha} \quad \hat{\Psi}_{r\beta} \quad \hat{\omega}_r)^T_k. \quad (21)$$

На рис. 2 представлена функціональна схема бездатчикового векторного асинхронного електропривода, замкненого за сигналом ідентифікатора стану на основі фільтра Калмана. Вимірювані статорні напруги U_{sA} , U_{sB} , U_{sC} і струми I_{sA} , I_{sB} , I_{sC} асинхронного двигуна трансформуються перетворювачами фаз (ПФ) у напруги $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ і струми $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ нерухомої системи координат α, β , які є вхідними сигналами для фільтра Калмана (ФК). ФК на основі вимірюваних статорних напруг і струмів АМ розраховує поточні значення потокозчеплення ротора та кутової швидкості вала двигуна. На систему керування електроприводом, яка включає в себе регулятори швидкості, потокозчеплення та складових частин струму статора, подаються сигнали завдання на швидкість і потокозчеплення ротора. У складі системи керування передбачене перетворення статорних струмів із нерухомої системи координат α, β на обертову систему координат u, v , орієнтовану за вектором потокозчеплення ротора. Оцінки потокозчеплень $\hat{\Psi}_{r\alpha}$, $\hat{\Psi}_{r\beta}$ із виходу ідентифікатора ФК подаються на векторний аналізатор і дозволяють розрахувати напрямні синус $\sin\delta$, косинус $\cos\delta$ і модуль потокозчеплення ротора $\hat{\Psi}_r$. Регулятори одержують сигнали статорних струмів I_{su} , I_{sv} і розрахованих із використанням фільтра Калмана модуля потокозчеплення ротора та кутової швидкості вала двигуна. Фільтр Калмана є лінійним адаптивним фільтром рекурсивного

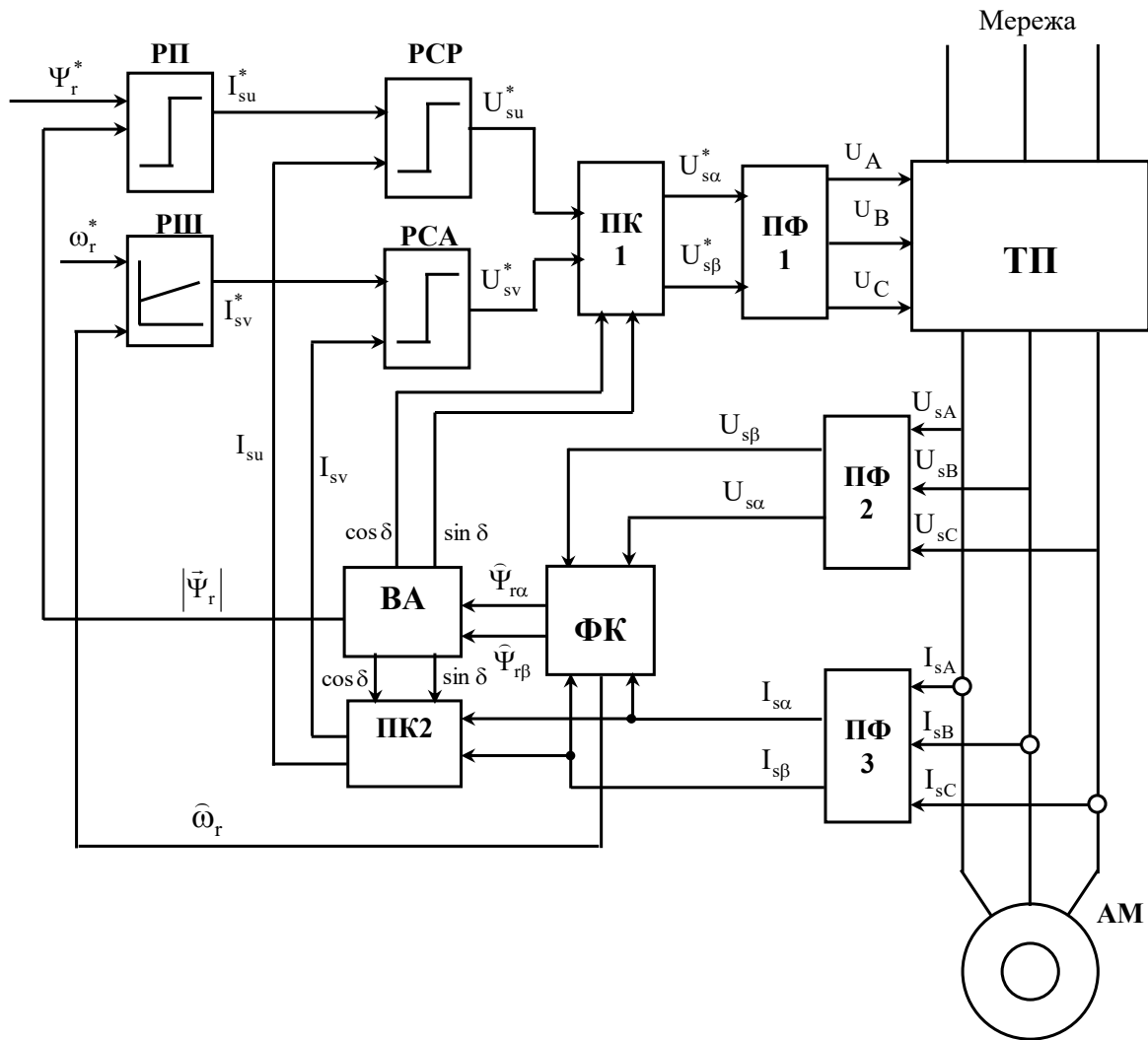


Рис. 2. Функціональна схема асинхронного електропривода з релейно-векторною системою керування та фільтром Калмана для оцінки змінних стану

типу, який дозволяє одержати дані про змінні стану АМ на підставі вимірювальної інформації в умовах дії на АМ випадкових перешкод і збурень. Водночас перешкоди, що діють на двигун, мають являти собою білий гаусівський шум. Фільтр Калмана технічно реалізується у вигляді програмного коду будь-якою мовою програмування в мікроконтролері.

Мовою програмування Matlab написана програма розрахунку перехідних процесів в асинхронному ЕП з векторним керуванням у результаті розв'язання рівнянь усіх блоків функціональної схеми. Використовувалася АМ типу 4A132M4 з такими паспортними даними: $P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_{лн} = 380 \text{ В}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $I_n = 22 \text{ А}$. У програмі задавався шум вимірів струмів статора у вигляді гаусівського випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням і середнім квадратич-

ним відхиленням $\sigma_{I_{s\alpha}} = \sigma_{I_{s\beta}} = 1,2 \text{ А}$. Тоді матриця R постійна і дорівнює $R = \text{diag}[\sigma_{I_{s\alpha}}^2, \sigma_{I_{s\beta}}^2]$. Матриця Якобі J розраховується і тим самим оновлюється на кожному інтервалі дискретизації за часом перехідних процесів. На роботу алгоритму ідентифікації істотний вплив чинить постійна матриця Q , яка підбиралася у процесі налаштування системи керування розрахунком її математичної моделі й у підсумку прийнята такою:

$$Q = \text{diag}[\sigma_{r\alpha}^2, \sigma_{r\beta}^2, \sigma_{r\psi\alpha}^2, \sigma_{r\psi\beta}^2, \sigma_{r\omega}^2] = [0.02^2, 0.02^2, 0.0004^2, 0.0004^2, 0.1^2].$$

У системі керування три релейні регулятори й один лінійний ПІ-регулятор швидкості. Причому додавання диференціальної складової частини до складу регулятора швидкості не поліп-

ше перехідного процесу швидкості, а саме не прибирає перерегулювання.

На рис. 3 представлені графіки перехідних процесів в асинхронному електроприводі з векторною системою керування, у контурі зворот-

ного зв'язку якої для оцінки змінних стану включений фільтр Калмана. Спочатку здійснюється збудження АМ, потім розгін до 140 рад/с, накид, з подальшим зняттям, номінального моменту навантаження на вал АМ і гальмуванням до

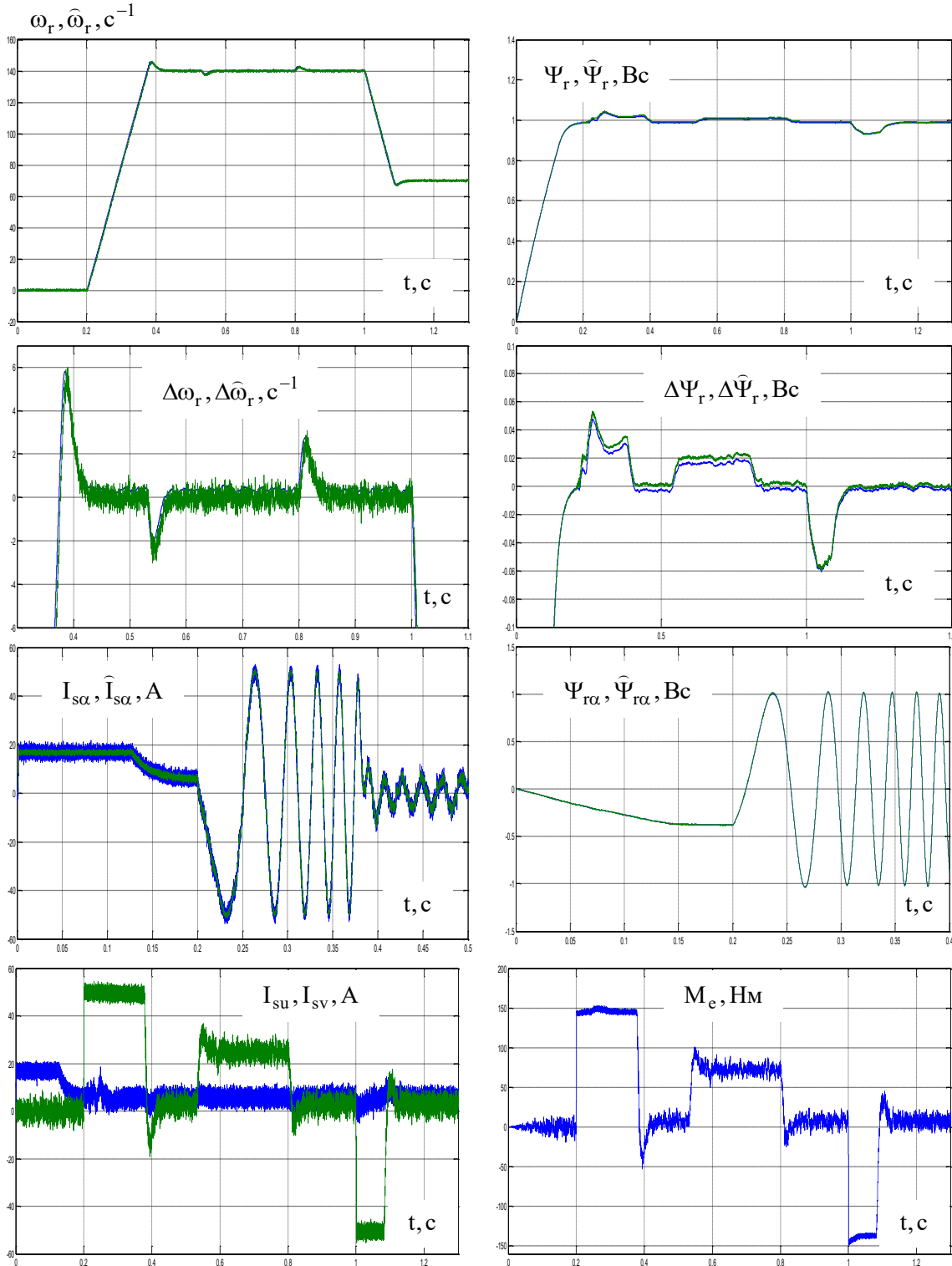


Рис. 3. Перехідні процеси в асинхронному електроприводі з релейно-векторною системою керування і фільтром Калмана для оцінки змінних стану

швидкості 70 рад/с. На всіх діаграмах (окрім двох останніх) синім кольором позначені реальні змінні АМ, а зеленим кольором – оцінки змінних стану, знайдені за алгоритмом Калмана. Зворотні зв'язки на релейні регулятори складових частин вектора струму статора (на рис. 3 реактивний струм позначений синьою лінією, активний струм – зеленою) подаються безпосередньо з датчиків струму разом із перешкодою виміру (без фільтрації). Фільтрація струмів I_{α}, I_{β} здійснюється у блоці ФК для забезпечення збіжності алгоритму Калмана до оцінюваних координат проєкцій потокозчеплення ротора Ψ_{ra}, Ψ_{rb} і його швидкості обертання ω_r . Сигнали зворотних зв'язків, які надходять на регулятори швидкості та потокозчеплення, обчислюються за алгоритмом Калмана. Стабілізація потокозчеплення релейним регулятором із перемикаючою функцією в базисі перших похідних здійснюється з незначною статичною помилкою за каналом збурення моментом навантаження на валу АМ. ПІ-регулятор швидкості забезпечує астатизм регулювання швидкості за збурюючим впливом моментом навантаження.

Висновки. У роботі методом математичного моделювання досліджена динаміка релейно-векторної системи керування АМ з фільтром Калмана в колі зворотного зв'язку. Доведена стійкість системи та досить висока точність регулювання швидкості в області її високих і середніх значень. У запропонованій системі керування з обраним алгоритмом ідентифікації відсутній статизм регулювання фактичної швидкості обертання вала АМ, що не вдавалося зробити у структурах спостерігачів, розроблених авторами у статтях [1; 2]. Становить інтерес дослідження властивостей системи керування з фільтром Калмана під час регулювання в області низьких швидкостей обертання вала та за параметрів АМ, що змінюються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Спостерігач швидкості обертання ротора асинхронного вентильного каскаду / О.В. Ключев та ін. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2022. Вип. 1 (40). С. 89–99. DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.11.
2. Спостерігач швидкості обертання і потокозчеплення ротора в системі векторного керування асинхронним електроприводом / О.В. Ключев та ін. *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.

3. Research on robust performance of speed-sensorless vector control for the induction motor using an interfacing multiple-model extended Kalman filter / Z.G. Yin et al. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. Vol. 29. № 6. P. 3011–3019.

4. Khalaf S.G. Optimal gain Kalman filter design with DC motor speed controlled parameters. *Journal of Asian Scientific Research*. 2013. Vol. 3. № 12. P. 1157–1172.

5. Ващенко Я.В. Метод виявлення пошкоджень у тяговому асинхронному електроприводі на основі його математичної моделі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Дніпро, 2015. Вип. 157. С. 176–184.

6. Identification of induction motor parameter using an extended Kalman filter / R. Jaramillo et al. *IEEE Xplore*. 2004. P. 584–588. DOI: 10.1109/ICEEE.2004.1433952.

7. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Application of the Kalman filters to the high-performance drive system with elastic coupling. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. № 11. P. 4226–4235.

8. A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives / Y. Zhang et al. *IEEE Energy conversion congress and exposition*. 2009. P. 2466–2473. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316508.

9. Sensorless vector control of induction motor using an EKF and SVPWM algorithm / Y. Zahraoui et al. *5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. Marrakech : IEEE, 2016. P. 588–593. DOI: 10.1109/ICMCS.2016.7905584.

10. Singh K., Singh M. Design of Kalman Filter for induction motor drive. *Students conference on Engineering and system*. Allahabad, India, April 2013. P. 156–162. DOI: 10.1109/SCES.2013.6547575.

11. Alonge F., D'Ippolito A. Robustness analysis of an extended Kalman Filter for sensorless control of induction motors. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2010. P. 3257–3263. DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637887.

12. Kiselichnik O., Vodson M., Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter. *Electrical engineering*. 2011. Vol. 82. № 2. P. 69–75. DOI: 10.3103/S1068371211020088.

13. Darvishi A., Doroudi A. Continuous Estimation of Speed and Torque of Induction Motors Using the Unscented Kalman Filter under Voltage Sag. *DYNA*. 2019. Vol. 86. № 208. P. 37–45. DOI: 10.15446/dyna.v86n208a4.65567.

14. Laowanitwattana J., Uatrongjit S. Induction motor states and parameters estimation using Extended Kalman Filter with reduced number of measurements. *International conference on electrical machines and System*. IEEE. 2015. P. 1631–1635. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385302.

15. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів, навчальний посібник / О.П. Чорний та ін. Кременчук, 2019. 122 с.

USING THE KALMAN FILTER AS A STATE OBSERVER IN THE VECTOR CONTROL SYSTEM ASYNCHRONOUS MACHINE

Oleg Klyuev

Ph. D., Associate Professor,

Dnipro State Technical University, 2 Dnirobudivska str., Kamianske, Ukraine, 51900, kluev2006@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4542-3317

Oleksandr Sadovoy

Doctor of Science, Professor

National Technical University “Dniprovsk Polytechnic”, 19 Dmytro Yavornytskoho str., Dnipro, Ukraine, 49005, sadovoyav@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9739-3661

Serhiy Sergienko

Ph.D., Associate Professor,

Kremenchug National Technical University named after Mykhailo Ostrogradskyi, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Ukraine, 39600, serhiy.serhiyenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3977-5239

Yulia Sokhina

Ph.D., Associate Professor

Dnipro State Technical University, 2 Dnirobudivska str. Kamianske, Ukraine, 51900, jvsokhina@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4329-5182

Purpose. The article is aimed at solving the problem of the synthesis of the speed observer and rotor flux coupling based on the Kalman filter algorithm in order to increase the accuracy of identification and regulation of state variables in an asynchronous electric drive with relay-vector control. **Methodology.** To improve the accuracy of speed control in a sensorless asynchronous electric drive, an algorithm for a discrete extended Kalman filter has been developed as part of a relay-vector control system in order to identify the speed and flux vector of the rotor of an asynchronous machine. The observer model is based on the equations of electromagnetic processes in an asynchronous machine, written in discrete time, and also includes the well-known recurrent Kalman filter algorithm, which allows extrapolating the values of the drive state variables at each calculation cycle. Control systems with observers, synthesized on the basis of theorems on the stability of motion, have a droop in the perturbing action. In contrast to them, when closing the feedback through the Kalman filter in the relay-vector control system, there is no static speed control error. Astatism of speed control in the proposed vector sensorless control system, taking into account random errors in measuring stator currents, is confirmed by the method of mathematical modeling. **Results.** The dynamics of the speed stabilization system with the joint operation of relay controllers and the digital Kalman filter algorithm built into its composition for real-time identification of state variables of an asynchronous machine is studied. A control system has been obtained with more accurate speed control than in the case of using observer structures that provide only the stability of the controlled process without ensuring its desired dynamic performance. **Originality.** The methods of vector control of an asynchronous machine and digital filtering are combined in order to create a sensorless control system with improved speed control accuracy. **Practical value.** The use of the developed observer will improve the coordinate accuracy of regulation under the influence of random noise on the process of measuring the electrical quantities of an asynchronous machine. At the same time, the operational reliability of the electric drive is increased, its cost is reduced and its dimensions are reduced.

Key words: asynchronous electric drive, state variables, digital filtering, Kalman filter, rotor speed, flux coupling vector, modeling.

REFERENCES

1. Klyuyev O.V., Sadovoj O.V., Sohina Yu.V. (2022). Sposterigach shvidkosti obertannya rotora asinhronnogo ventilnogo kaskadu [Observer of the speed of rotation of the rotor of the asynchronous gate cascade]. *Zbirnik naukovih prac Dniprovskogo derzhavnogo tehničnogo universitetu (tehnični nauki)*. Kam'ianske. Vol. 1 (40). Pp. 89–99. DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.11 [in Ukrainian].
2. Klyuyev O.V., Sadovoj O.V., Sohina Yu.V. (2022). Sposterigach shvidkosti obertannya i potokozheplennya rotora v sistemi vektornogo keruvannya asinhronnim elektroprivodom [Observer of the speed of rotation and flux coupling of the rotor in the system of vector control of an asynchronous electric drive]. *Zbirnik naukovih prac Dniprovskogo derzhavnogo tehničnogo universitetu (tehnični nauki)*. Kam'ianske. Vol. 2 (41). Pp. 89–97. DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.10 [in Ukrainian].

3. Yin Z.G., Yan R.U., Zhong Y.R. (2014). Research on robust performance of speed-sensorless vector control for the induction motor using an interfacing multiple-model extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 29. № 6. Pp. 3011–3019.
4. Khalaf S.G. (2013). Optimal gain Kalman filter design with DC motor speed controlled parameters. *Journal of Asian Scientific Research*. Vol. 3. № 12. Pp. 1157–1172.
5. Vashenko Ya.V. (2015). Metod viyavleniya poshkodzhen u tyagovomu asinhronnomu elektroprivodi na osnovi jogo matematichnoyi modeli [The method of detecting damage in a traction asynchronous electric drive based on its mathematical model]. *Zbirnik naukovih prac UkrDUZT. Dnipro*. Vol. 157. Pp. 176–184 [in Ukrainian].
6. Jaramillo R., Alvarez R., Urdenas V., Nunez C. (2004). Identification of induction motor parameter using an extended Kalman filter. *IEEE Xplore*. Pp. 584–588. DOI: 10.1109/ICEEE.2004.1433952.
7. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. (2012). Application of the Kalman filters to the high-performance drive system with elastic coupling. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 59. № 11. Pp. 4226–4235.
8. Zhang Y., Zhao Z., Lu T., Yuan L. (2009). A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives. *IEEE Energy conversion congress and exposition*. Pp. 2466–2473. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316508.
9. Zahraoui Y., Fahassa C., Akherraz M., Bennassar A. (2016). Sensorless vector control of induction motor using an EKF and SVPWM algorithm. *In: 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. Marrakech : IEEE. Pp. 588–593. DOI: 10.1109/ICMCS.2016.7905584.
10. Singh K., Singh M. (2013). Design of Kalman Filter for induction motor drive. *Students conference on Engineering and system. Allahabad, India*. Pp. 156–162. DOI: 10.1109/SCES.2013.6547575.
11. Alonge F., D’Ippolito A. (2010). Robustness analysis of an extended Kalman Filter for sensorless control of induction motors. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Pp. 3257–3263. DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637887
12. Kiselichnik O., Vodson M. (2011). Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter. *Electrical engineering*. Vol. 82. № 2. Pp. 69–75. DOI: 10.3103/S1068371211020088.
13. Darvishi A., Doroudi A. (2019). Continuous Estimation of Speed and Torque of Induction Motors Using the Unscented Kalman Filter under Voltage Sag. *DYNA*. Vol. 86. № 208. Pp. 37–45. DOI: 10.15446/dyna.v86n208a4.65567.
14. Laowanitwattana J., Uatrongjit S. (2015). Induction motor states and parameters estimation using Extended Kalman Filter with reduced number of measurements. *International conference on electrical machines and System. IEEE*. Pp. 1631–1635. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385302.
15. Chornij O.P., Zachepa Yu.V., Tityuk V.K., Chorna O.A. Monitoring i diagnostika elektromehaničnih ob’ektiv [Monitoring and diagnostics of electromechanical objects] : Navchalnij posibnik. Kremenchug, 2019. 122 p. [in Ukrainian].

Стаття надійшла 16.09.2022