

## ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 62.20

С.Ю. Олійник, О.В. Корнієнко, В.П. Бунь,  
К.І. Лук'янець

### ОПТИМАЛЬНА ФІЛЬТРАЦІЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ КАЛМАНІВСЬКОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЮ ГЕНЕРАТОРА ЕНЕРГОБЛОКА В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ПРОМИСЛОВИХ ЗАВАД

#### Вступ

Жорстка конкуренція в усіх сегментах ринку спонукає сучасний бізнес до максимальної оптимізації виробництва і мінімізації затрат за рахунок використання систем автоматизованого і автоматичного керування (САР). Крім того, екстремальний ріст обчислювальної потужності сучасної цифрової техніки дає можливість використовувати високоінтелектуальні програмні методики обробки масивів інформації в режимі реального часу.

Добре відомо, що основне обладнання ТЕС України експлуатується вже довгий час і повністю або майже повністю використало свій ресурс. Внаслідок цього підвищується ймовірність відмов у роботі обладнання, що призводить до позаштатних та аварійних ситуацій і навіть до зупинки енергоблоків. Підвищення якості інформаційного супроводження технологічного процесу сприяє підвищенню його надійності та безаварійності.

Електричний генератор ТЕС – це трифазна неявнополюсна синхронна електрична машина, призначена для вироблення електричної енергії. Для контролю стану агрегата використовується температура внутрішнього простору, що охолоджується потоком водню. Температура вимірюється за допомогою термометрів опору, вмонтованих в обмотки статора. Кількість датчиків може досягати 400. При перевищенні будь-якої температури виникає загроза руйнації обладнання. Вимірювання відбуваються в умовах завад, в тому числі й екстремального характеру, які можуть скрити аварійну ситуацію або, навпаки, викликати помилкове спрацювання систем захисту. Індивідуальна апаратна реалізація кожного каналу вимірювання не є виправданою з суто економічних чинників, тому зазвичай використовується цифрова багатоканальна апаратура з мультиплексуванням каналів. Наявність мультиплексування не до-

зволяє використовувати апаратні фільтри, і єдиним засобом пригнічення завад залишаються програмні методи. Канали вимірювання при температурному контролі дуже подібні за своїми властивостями, тому достатньо визначити процедуру фільтрації для одного каналу, а потім узагальнити її для всієї системи. Складний алгоритм фільтрації наводиться в [1], проте він потребує індивідуальних налаштувань у кожному випадку вимірювань і результат видає після обробки істотного за обсягом набору даних, тобто не може використовуватись як універсальне рішення.

#### Постановка задачі

Основна мета статті – пошук ефективного алгоритму фільтрації даних, отриманих із первинних датчиків, на основі цифрового алгоритму, який не потребує заміни вже встановленої апаратури і при цьому за рахунок заміни програмного забезпечення перевищує аналоги по фільтруючих якостях і має можливість безперервної видачі вихідних даних.

#### Дослідження сигналу і завад та обґрунтування вибору фільтра

Досліди проводились на генераторі потужністю 250 МВт Київської ТЕЦ-6. Схема вимірювань складається з трьох послідовних компонентів: датчики – термоперетворювачі опору, з'єднувальні проводи та вимірювальний блок контролера L-Card. Вимірювальний блок перетворює температуру в деяку умовну числову величину – дискрету, на основі якої в інформаційній системі в подальшому визначається температура за формулою

$$\theta = k(D - D_0),$$

де  $\theta$  – температура в градусах Цельсія;  $D$  – дискрета, що відповідає вимірюванню опору термоперетворювача;  $k$ ,  $D_0$  – коефіцієнти перетворення, які залежать від типу АЦП, що використовується.

У нашому випадку залежність температури від дискрети мала вигляд

$$\theta = 0,025(D - 1000).$$

Інженерні умови визначають необхідну якість фільтрації через допустиме максимальне відхилення вихідного сигналу фільтра від дійсного значення параметра. Воно дорівнює  $0,2^\circ\text{C}$

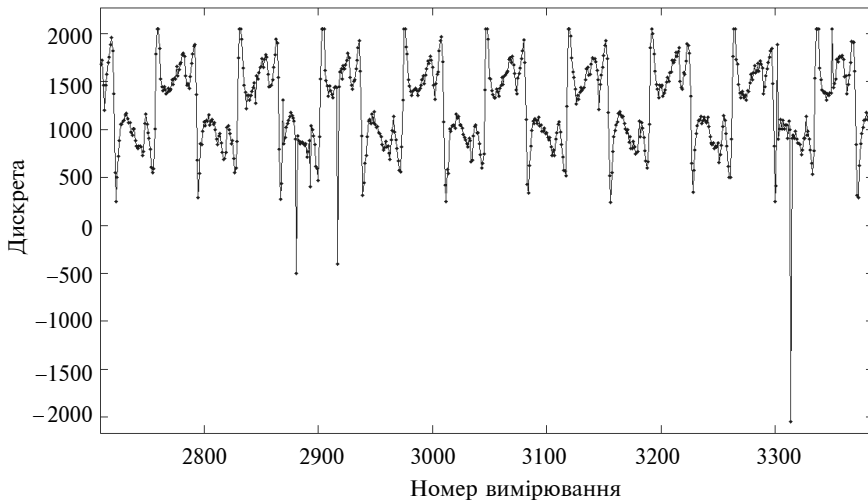


Рис. 1. Фрагмент досліджуваної експериментальної вибірки зашумлених вимірювань

і в перерахунку на величину дискрети становить 8. У зв'язку з лінійністю залежності (1) алгоритм фільтрації будемо знаходити для сигналу в дискретах, тобто задачу фільтрації вважатимемо розв'язаною, якщо протягом всіх спостережень максимальне відхилення не буде перевищувати 8 дискрет.

Для досліджень на діючому генераторі потужністю 250 МВт у стаціонарному режимі з постійною температурою було отримано вибірку експериментальних даних по одному каналу в кількості 8000 вимірів. Реальний час одного виміру становив 0,281 мс. Фрагмент вибірки наведено на рис. 1. Від'ємні значення у вибірці відразу були трактовані як невдалі через їх принципову неможливість і в подальшому не враховувались. Випадковий початок відліку даних у вибірці дає можливість зімітувати ситуацію, яка відповідає вимірюванню довільної тривалості з багатоканальним мультиплексуванням, коли кожний канал вимірюється в свій проміжок часу.

Статистичний аналіз вибірки даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Статистичні характеристики вимірюного сигналу

Параметр сигналу	Варіація	Медіана	Середнє значення	Максимальне відхилення	Дисперсія
Значення	2095	1220	1238	1209	$1,77 \cdot 10^5$

З табл. 1 випливає, що необхідно використати фільтрацію, що зменшить максимальне від-

хилення не менше, ніж в 150 разів. Емпіричний аналіз даних дає можливість зробити такі висновки:

- процес квазістаціонарний;
- основна завада – періодична. Аналіз спектральної густини і потужності спектральної густини шуму за методом [2] показує, що найпотужніший вплив шуму припадає на промислову частоту 50 Гц та її гармоніки (рис. 2);
- крім періодичної завади, є також завади різної природи і властивостей.

Звичним у такому випадку здається використання низькочастотного фільтра (НФ), виконаного у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з передавальною функцією

$$W(s) = \frac{1}{T_{\phi}s + 1}$$

і амплітудно-частотною характеристикою НФ

$$A(\omega) = \frac{1}{T_{\phi}^2\omega^2 + 1}$$

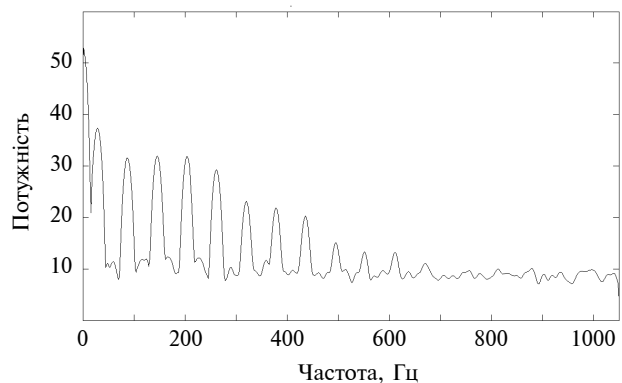


Рис. 2. Частотний спектр вимірюваного сигналу

Для того щоб забезпечити коефіцієнт придушення завади в 1/150 на частоті 50 Гц стала часу фільтра має дорівнювати приблизно 320 мс. Однак при дослідженнях виявилось, що якість НФ з  $T_{\phi} = 320$  мс є незадовільною – варіація вихідної величини в сталому режимі досягає 30 дискрет (рис. 3). Це пояснюється характером сигналу, який складається з кількох компонент різної природи. Намагання покра-

щити якість фільтрації збільшенням  $T_\Phi$  покращує ситуацію дуже повільно. До того ж, збільшення сталої часу значно затягує перехідний процес встановлення нової величини сигналу в перехідному режимі. Тому НФ для цієї задачі не підходить.

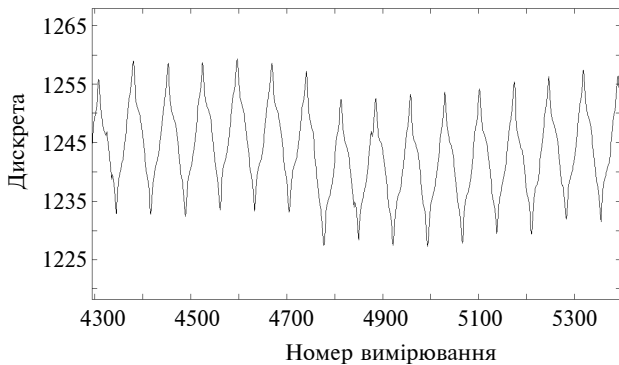


Рис. 3. Вихідний сигнал із низькочастотного фільтра

Використання методики комбінованої інженерної фільтрації (КІФ) як в [1] хоч і дає прийнятний результат, але для роботи потребує деякого істотного за обсягом набору вимірюваних даних. Обсяг набору даних повинен визначатись індивідуально в кожному випадку вимірювань за досить складним емпіричним алгоритмом з істотним обсягом обчислень, що ускладнює використання методики на практиці. У наведеному прикладі для визначення чергової точки використовувався набір з 145 вимірюваних даних, як це було запропоновано в [1]. Результат роботи КІФ наведено на рис. 4. Слід зазначити, що КІФ видає дані не на кожному кроці вимірювань, а на кожному циклі роботи алгоритму, тобто один раз на 145 вимірювань у нашому випадку. Це накладає деякі обмеження на використання КІФ на практиці

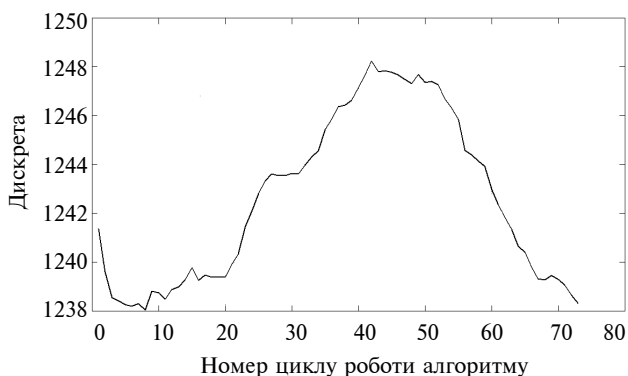


Рис. 4. Результат фільтрації комбінованою інженерною методикою

для задач, які потребують неперервного надходження даних.

Як теоретичне рішення було вибрано фільтр Калмана (ФК) і зроблено висновки щодо перспектив його застосування в теплоенергетиці.

### Огляд вибраного теоретичного рішення

У 1961 р. Р. Калман запропонував альтернативний варіант вирішення традиційної вінерівської проблеми оптимальної лінійної фільтрації через формулювання задачі мінімальної середньоквадратичної похибки для моделі в просторі станів (МПС). Основні риси запропонованого фільтра – векторне моделювання випадкових процесів і рекурсивна обробка зашумлених вимірювань [3]. Алгоритм, який має цифрову природу, добре зарекомендував себе в галузях навігації, зв'язку, розпізнання мовлення тощо.

Нехай маємо стохастичний випадковий процес, який може бути змодельований у вигляді

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k. \quad (2)$$

Нехай також маємо набір дискретних вимірів процесу (1):

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (3)$$

де  $\mathbf{x}_k = [n \times 1]$  – вектор станів процесу (1) в момент часу  $t_k$ ;  $\Phi_k = [n \times n]$  – перехідна матриця станів;  $\mathbf{u}_k = [n \times 1]$  – вектор управління процесом (1) в момент часу  $t_k$ ;  $\mathbf{B}_k = [n \times n]$  – матриця управління;  $\mathbf{w}_k = [n \times 1]$  – адитивний білий шум з відомою коваріаційною структурою;  $\mathbf{z}_k = [m \times 1]$  – вектор вимірювань процесу в момент часу  $t_k$ ;  $\mathbf{H}_k = [m \times n]$  – матриця вимірювань;  $\mathbf{v}_k = [m \times 1]$  – адитивний білий шум з відомою коваріаційною структурою і нульовою крос-кореляцією з  $\mathbf{w}_k$ .

Коваріаційні матриці для  $\mathbf{w}_k$  і  $\mathbf{v}_k$  мають вигляд

$$E[\mathbf{w}_k, \mathbf{w}_k^T] = \begin{cases} \mathbf{Q}_k, & i = k, \\ 0, & i \neq k, \end{cases}$$

$$E[\mathbf{v}_k, \mathbf{v}_k^T] = \begin{cases} \mathbf{R}_k, & i = k, \\ 0, & i \neq k, \end{cases}$$

$$E[\mathbf{v}_k, \mathbf{w}_k^T] = 0 \quad \forall i, k.$$

Для забезпечення безперервної видачі вихідного сигналу в алгоритмі циклічно виконуються етапи обробки наявних даних, самооптимізації по мінімуму середньоквадратичного відхилення та передбачення наступних станів системи.

Математичний запис рівнянь алгоритму ФК має такий вигляд [4]:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1},$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-),$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T,$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \Phi_k \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{B}_k \hat{\mathbf{u}}_k,$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \Phi_k \mathbf{P}_k \Phi_k^T + \mathbf{Q}_k.$$

Використання ФК має ряд істотних переваг порівняно з іншими фільтрами. Це – уніфікація обробки для всіх видів завад, можливість отримання даних на кожному циклі вимірювань та можливість “передбачення” наступних станів системи (наприклад, це корисно для систем діагностування).

Для виконання дослідження роботи ФК було виконано його програмну реалізацію в середовищі MatLab [5, 6]. Розроблене програмне забезпечення розв’язує задачу фільтрації деякого масиву даних з використанням ФК з можливістю настройки по параметрах  $Q, R$ . Модель процесу (в нашому випадку каналу вимірювання температури генератора) задається за допомогою матриць  $\Phi, \mathbf{B}, \mathbf{H}$ . Слід врахувати, що для реального технологічного процесу попередня оцінка вектора станів  $x_0$  (найчастіше вектора технологічних змінних) і  $P_0$  доступні лише для статичних режимів та є неточними.

З метою спрощення розрахунків як базової моделі генератора з інженерних міркувань було вибрано передавальну функцію без запізнення:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}. \quad (4)$$

Параметри об’єкта:  $k = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C/МВт}$ ,  $T = 300 \text{ с}$ .

У дискретному вигляді при періоді дискретизації 1 с для рівняння (2) маємо модель [7]

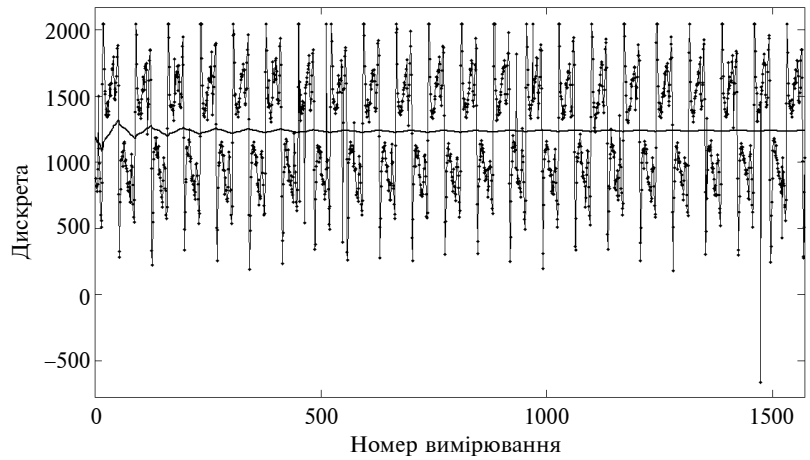


Рис. 5. Результат фільтрації ФК. Загальний вигляд

$$z_{k+1} = \frac{0,4x_k + 299z_k}{300},$$

$$\Phi = [0,9967]; \mathbf{B} = [0,0033]; \mathbf{H} = [1].$$

Початкові настройки ФК було вибрано відповідно до рекомендацій [4, 8]:

$$\mathbf{Q} = [1], \mathbf{R} = [1],$$

$$x_0 = [0], \mathbf{P}_0 = [10^6].$$

Емпіричним способом для досягнення кращої збіжності процесу фільтрації їх було дещо змінено і вони набули такого вигляду:

$$\mathbf{Q} = [0,25], \mathbf{R} = [4],$$

$$x_0 = [0], \mathbf{P}_0 = [10^6].$$

Результати роботи ФК наведено на рис. 5 (повний діапазон вимірювань) і рис. 6 (кінцевий діапазон вимірювань). У зв’язку з тим, що ФК потребує деякого етапу встановлення, всі якісні показники роботи ФК визначалися саме

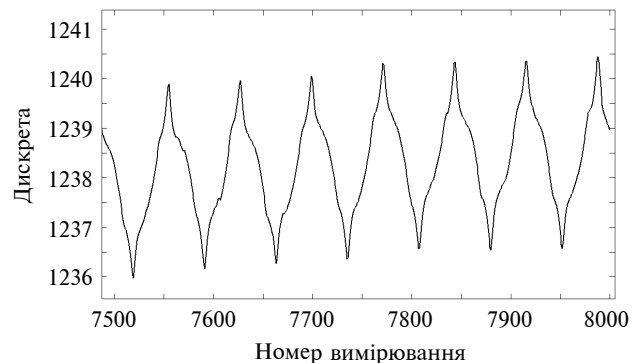


Рис. 6. Результат фільтрації ФК на інтервалі вимірювань 7500–8000

на кінцевому етапі фільтрації – періоді з 7500 до 8000 вимірювань.

### Використання ФК для задачі фільтрації даних з генератора

Ефективність роботи ФК визначалась порівняно з НЧФ (рис. 3) і КІФ (рис. 4). Для зручності порівняння всі статистичні дані зведено в табл. 2.

Таблиця 2. Показники роботи фільтрів

Фільтр	Дисперсія	Максимальне відхилення		Кількість вимірювань
	дискрети	дискрети	°С	
ФК	326,92	4	0,1	8000
НФ	627,17	25	0,625	8000
КІФ	387,33	5	0,125	145×n

Максимальне відхилення вихідного сигналу для ФК становить чотири дискрети, що приблизно в шість разів менше, ніж для НФ і дещо краще, ніж у КІФ. Це в перерахунку на фізичну величину технологічного параметра відповідає максимальному відхиленню в 0,1 °С, що дорівнює похибці вимірювань. При цьому потрібно врахувати, що вихідна величина встановлюється на кожному циклі вимірювань на відміну від комбінованої методики, яка результат видає після обробки повного набору даних вибірки (в даному випадку 145 вимірювань).

### Висновки

ФК в задачі фільтрації даних температурного контролю генератора пригнічує комбіновані завади краще традиційного НФ і КІФ, використаного на генераторі Київської ТЕЦ-6. Його застосування в промислових умовах дає можливість підвищити якість даних в інформаційній системі за рахунок їх неперервного надходження на відміну від КІФ і при цьому не потребує значної модернізації обладнання. Сама методика має універсальний характер і може бути використана для широкого класу задач фільтрації.

Розроблений алгоритм оптимальної фільтрації було запропоновано для використання в контролері L-Card, який є складовою частиною системи температурного контролю генератора на Київській ТЕЦ-6, що сприятиме розширенню обсягу задач діагностування стану обладнання через неперервність надходження даних на відміну від теперішньої ситуації, коли дані надходять з перервами.

У подальшому планується продовжити роботи в тому ж напрямку. Зокрема, перспективним виглядає використання модифікацій багатомодельного ФК з адаптацією моделі, що може істотно покращити ефективність роботи фільтра для аналогічних виробничих задач.

С.Ю. Олейник, А.В. Корниенко, В.П. Бунь,  
К.И. Лукьянец

ОПТИМАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ КАЛМАНОВСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ ГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА В УСЛОВИЯХ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОМЕХ

Рассматривается применение калмановской фильтрации для обработки реальных данных, которые были получены системой температурного контроля генератора и содержат в себе сложную комбинацию различных помех. Показано, что фильтр Калмана обеспечивает необходимое качество фильтрации и в отличие от традиционных и специфических ранее использованных методов программной фильтрации может выдавать данные непрерывно. Предложенный метод может использоваться специалистами по автоматизации в области фильтрации сложных комбинированных помех в теплоэнергетике.

S.Yu. Oliynyk, A.V. Korniyenko, V.P. Bun,  
K.I. Lukianets

OPTIMAL DATA FILTRATION BASED ON KALMAN'S ALGORITHM FOR TEMPERATURE CONTROL OF THE POWER GENERATING UNIT UNDER CONSIDERABLE INDUSTRIAL NOISE INFLUENCE

In this paper, we utilize the Kalman's filtration algorithm for processing the real data obtained from the temperature control system. This data consists of a complex combination of various noises. We prove that the Kalman's filter satisfies the required filtration quality. Moreover, it can continuously process the data unlike traditional and previously used methods of programmatic filtration. Therefore, our method can be used by automatic control experts for data filtration of complex combination of noises in the field of heat power engineering.

1. *Батюк С.Г., Олійник С.Ю.* Методика оптимальної фільтрації даних за умов значних промислових перешкод // Автоматика. Автоматизація. Електричні комплекси та системи. – 2009. – № 1. – С. 147–151.
2. *Welch P.D.* The use of fast Fourier transforms for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short modified periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. – 1967. – **15**. – P. 15–17.
3. *Kalman R.E., Bucy R.* New Results in Linear Filtering and Prediction. – TRANS. ASME, 1961. – 270 p.
4. *Brown R.G., Hwang P.Y.C.* Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. – John Wiley & Sons, 1997. – 484 p.
5. *Grewal M.S., Andrews A.P.* Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB. – John Wiley & Sons, 2001. – 401 p.
6. *Haykin S.* Kalman Filtering and Neural Networks. – John Wiley & Sons, 2001. – 304 p.
7. *Стрейц В.* Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / Пер. с англ.; Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука. Глав. редакция физ.-мат. лит.-ры, 1985. – 296 с.
8. *Gelb. A.* Applied Optimal Estimation. – MIT Press. Cambridge, MA, 1974. – 372 p.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
25 листопада 2010 року