

УДК 004.93'1

О.С. Меньяйленко, О.І. Захожай

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМАХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИМІРЮВАННЯ

The article is devoted to the application of information technology for the ultrasonic measurement of linear distances. The most attention is done on improving the accuracy and expansion bands of measurement. For that problem's solving, using of the multi-channel ultrasonic measuring system that consists a plurality of sensors with various measuring characteristics is proposed. To ensure constantly high measurement accuracy in a wide range, a new information technology of automated data processing in multi-channel ultrasonic measurement systems, which are based on a multi-threaded data received from a plurality of sensors and determine the most reliable measurement result, have been proposed.

**Keywords:** ultrasonic measurement systems, improving accuracy and expansion bands of ultrasonic measurement, multichannel measurement systems.

### Вступ

Методи і засоби ультразвукового вимірювання відстані широко використовуються в сучасній техніці для розв'язання різноманітних прикладних задач, у тому числі в автоматизованих системах контролю та керування [1, 2]. Серед найпоширеніших застосувань ультразвукових систем вимірювання можна виокремити [3–5]: системи контролю положення та переміщень фізичних об'єктів, системи ідентифікації механічних перешкод, визначення рівня заповнення резервуарів, підрахунок кількості механічних об'єктів та контроль проміжків. Широке використання ультразвукових систем вимірювання пов'язане з низкою таких переваг: безконтактний неруйнівний контроль і вимірювання, широкий діапазон відстані, що вимірюється, інваріантність до широкого спектра можливих перешкод, включаючи електромагнітні та радіоактивні.

За умови постійного збільшення попиту на ультразвукові системи вимірювання існує необхідність покращення експлуатаційних показників, підвищення точності та розширення діапазону вимірювань. Сучасний рівень розвитку інформаційних технологій забезпечує необхідну теоретико-методологічну базу для вдосконалення систем різноманітного застосування. В цьому сенсі актуальним є завдання впровадження методів і засобів автоматизованої обробки даних у системах ультразвукового вимірювання.

### Постановка задачі

Метою роботи є вдосконалення існуючих підходів до побудови схем вимірювання та ін-

формаційних систем визначення достовірного значення відстані; обґрунтування використання багатоканальних ультразвукових систем вимірювання на основі датчиків із суміщеними приймачем і передавачем та підвищення точності вимірювальних систем із одночасним розширенням діапазону вимірювань.

### Аналіз задачі

Сучасні ультразвукові датчики, що використовуються у складі систем вимірювання, поділяються на два різновиди: із суміщеними та роздільними приймачем і передавачем [1, 3]. Вимірювальна схема із суміщеними приймачем і передавачем має істотний недолік, який полягає в тому, що після випромінювання сигналу має пройти деякий час, перш ніж закінчатся коливання мембрани випромінювача і стане можливою її робота на прийом зворотного сигналу. Цей інтервал часу називається "мертвим" часом датчика. Процес передачі та прийняття ультразвукового сигналу показано на рис. 1. Сигнал передачі можна умовно поділити на два етапи, тривалість яких позначена як  $T_{TR}$  – час формування сигналу передачі і  $T_D$  – "мертвий" час датчика. Інтервал часу між сигналом передачі та сигналом прийому, позначений  $T_L$ , характеризує вимірювану відстань до перепони, що викликала відбиття сигналу передачі. Відстань до об'єкта можна визначити так:

$$L = \frac{C \cdot T_L}{2}, \quad (1)$$

де  $C$  – швидкість поширення ультразвукової хвилі у просторі вимірів.

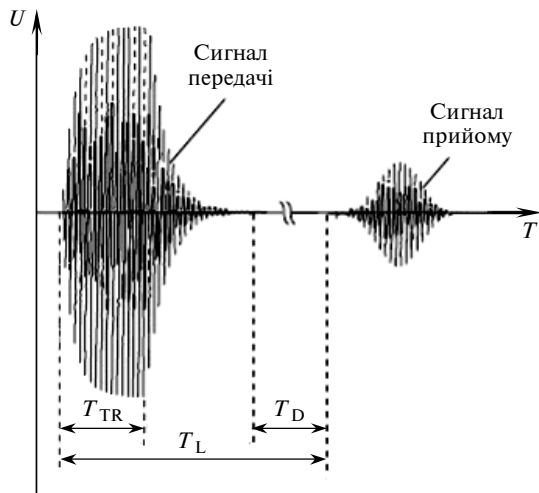


Рис. 1. Сигнали передачі та прийому ультразвукового датчика

Можливість вимірювання мінімальної відстані обмежена необхідністю виконання умови

$$T_L > T_{TR} + T_D. \quad (2)$$

Виходячи з (1) і (2), мінімальну відстань, що може бути визначена датчиком з характеристикою  $T_D$  на основі керуючого сигналу довжиною  $T_{TR}$ , можна визначити за виразом

$$L_{\min} = \frac{C \cdot (T_{TR} + T_D)}{2}. \quad (3)$$

Виходячи з (3), основним недоліком систем із суміщеними приймачем і передавачем є наявність мінімальних значень відстані, що не можуть бути зареєстровані датчиком. Таке обмеження визначається конструктивними особливостями системи вимірювання та характеристиками вибраного для цієї задачі ультразвукового датчика.

Основним недоліком систем вимірювання з роздільними приймачем і передавачем є складність реалізації, а також завищення результатів вимірювання на основі того, що для датчиків такої конструкції неможливе встановлення передавача та приймача на одній осі. Схема такої системи вимірювання наведена на рис. 2. Виходячи з наведеної схеми, системою вимірювання буде отримане значення  $T_L$ , що відповідає часу проходження шляху  $L_1 + L_2$ . Однак дійсна дистанція до перешкоди становить  $L$ . При цьому очевидно, що

$$2L \neq L_1 + L_2. \quad (4)$$

Відповідно до (4) створюється похибка визначення відстані, яка залежить від геометричних аспектів розміщення приймача та передавача. Відповідно до схеми на рис. 2, розбіжність у вимірюванні може бути легко розрахована і внесена як поправка до інформаційно-вимірювальної системи. Однак таке рішення легко реалізується у випадку, коли взаємне розміщення приймача та передавача залишається незмінним, а розміщення перешкоди ортогональне до осі визначення дійсної відстані  $L$ . У випадку динамічної зміни взаємного положення елементів системи вимірювання величина поправки не буде сталою, що значно ускладнює отримання точного результату вимірювання.

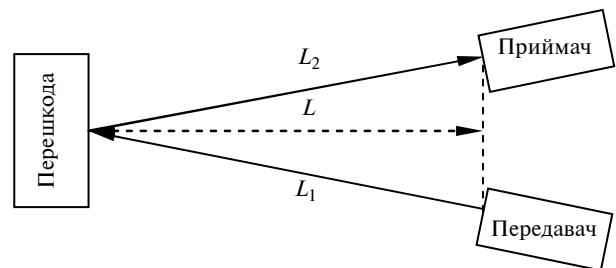


Рис. 2. Схема вимірювання з використанням роздільних передавача та приймача

Максимально допустима відстань вимірювання обмежена скінченною потужністю передавача, чутливістю приймача і характеристиками опору середовища прямому поширенню ультразвукової хвилі та відповідним коефіцієнтом загасання сигналу. Таким чином, можна зробити висновок, що існуючі підходи до побудови схем вимірювання та інформаційні системи визначення значення відстані потребують удосконалення у напрямі підвищення точності та розширення діапазону вимірювань.

### Розв'язання задачі

З метою розв'язання поставленої задачі підвищення точності та розширення діапазону вимірювання пропонується використати автоматизовану систему обробки даних, у якій для вимірювання відстані використовується  $k$  ультразвукових датчиків із суміщеними передавачем та приймачем. У результаті цього в системі формується  $k$  інформаційних каналів отримання результатів вимірювання відстані, які підлягають подальшій обробці з метою отримання у будь-який момент часу найбільш достовірного результату вимірювання.

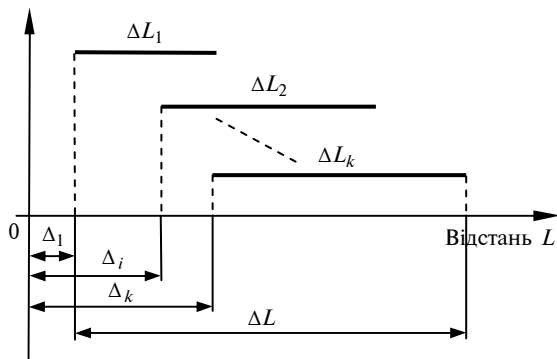


Рис. 3. Отримання загального діапазону вимірювань  $\Delta L$  у багатоканальних системах ультразвукового вимірювання

Виходячи з того, що характеристики ультразвукових датчиків фактично визначаються їх конструкцією, для розширення діапазону вимірювань необхідно використати сукупності  $k$  датчиків, у яких діапазони вимірювань доповнюють один одного. Принцип суміщення діапазонів вимірювань датчиків проілюстровано на рис. 3. Згідно з рисунком, кожен датчик характеризується діапазоном відстані, в якому може бути отриманий достовірний результат вимірювання. Ці діапазони схематично зображені на рисунку лініями з позначеннями  $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_k$ . При цьому для кожного датчика характерна “мертва” зона з характеристиками  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_k$  відповідно. Очевидно, що у випадку спільної обробки результатів вимірювань інформаційною системою мінімальна відстань реєстрації збігатиметься з мінімальною характеристикою “мертвої” зони одного з  $k$  датчиків (на рис. 3 це датчик 1). При цьому максимальне припустиме значення достовірного вимірювання відстані буде збігатися з максимальним значенням відстані для одного із датчиків (на рис. 1 це датчик  $k$ ).

Таким чином, загальний діапазон достовірного вимірювання відстані системою ультразвукових датчиків буде визначатися як  $\Delta L$ , що є значно ширшим, ніж будь-який діапазон кожного окремо взятого датчика. У цілому використання запропонованої багатоканальної системи ультразвукового вимірювання дає можливість значно розширювати діапазон вимірювань і синтезувати ультразвукові системи під конкретні умови використання.

Однак використання багатоканальної системи вимірювання створює додаткові складнощі визначення достовірного результату вимірювання. Це пов'язано з двома факторами: нерівномірністю характеристики точності вимірювання у всьому діапазоні для кожного датчика; наявністю зон перекриття діапазонів вимірювання окремих датчиків, що створює неоднозначність у визначенні остаточного результату.

Наявність цих двох аспектів вимагає в процесі автоматизованої обробки даних розв'язання додаткової задачі виключення надлишковості інформаційного простору та визначення достовірнішого результату вимірювань у будь-який момент часу та за будь-яких умов. Для розв'язання вказаних задач пропонується структурно-логічна схема автоматизованої обробки даних у багатоканальних системах ультразвукового вимірювання, яка наведена на рис. 4.

З урахуванням того, що задача визначення достовірного результату із сукупності вимірів не підлягає повному аналітичному представленню і прийняття рішень повинно здійснюватися за умови наявності фактора невизначеності, в основу інформаційної технології автоматизованої обробки даних пропонується покласти апарат багатопараметричних комбінованих систем розпізнавання образів [6, 7]. Доцільність використання саме цього різновиду систем розпізнавання полягає в тому, що багатопараметричні комбіновані системи розпізнавання образів оперують з кількома потоками даних різної природи та джерел їх виникнення.

Відповідно до наведеної структурно-логічної схеми (див. рис. 4), дані щодо вимірювання поточної відстані до об'єкта надходять по  $k$  інформаційних каналах ( $S_1-S_k$ ) від датчиків  $D_1-D_k$  до системи та попередньо оброблюються. На цьому етапі здійснюється нормування даних та формування на їх основі  $k$  образів, що характеризують кожен канал вимірювання. Сформована множина інформаційних образів

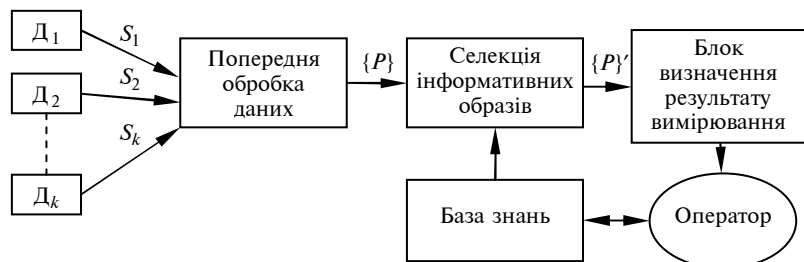


Рис. 4. Структурно-логічна схема автоматизованої обробки даних у багатоканальних системах ультразвукового вимірювання

$\{P\}$  підлягає селекції, і на її основі формується множина інформативних образів  $\{P'\}$ . Сукупність  $\{P'\}$  містить образи, що відповідають тим каналам виміру, що за наявних умов вимірювання забезпечують максимальну достовірність результату, при цьому

$$\{P'\} \subset \{P\}. \quad (5)$$

Селекція інформативних образів здійснюється через формування деякої критеріальної характеристики  $G$  на основі експертних знань, що вносяться до бази знань. Визначення критеріальної характеристики  $G$  розподілу множини  $\{P\}$  на два класи – інформативні та неінформативні – здійснюється за методикою, що викладена у [8] та на основі такої апріорної інформації бази знань: дані про типи ультразвукових датчиків; розміри “сліпої” зони датчика  $\{\Delta_k\}$ ; діапазони вимірювань датчиків  $\{\Delta L_k\}$ ; дані про розподіл точності вимірювання у всьому діапазоні датчика  $\{p_k(R)\}$ . Можливість додавання до бази знань характеристик датчиків надається оператору на основі його знань та евристики. В результаті інформаційну модель системи розпізнавання можна подати у вигляді

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_k \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_k \end{pmatrix} = \begin{cases} R_1, \{Ch_1|G\}, \\ R_2, \{Ch_2|G\}, \\ \dots \\ R_k, \{Ch_k|G\}, \end{cases} \quad (6)$$

де  $R_1-R_k$  – сукупність апостеріорних даних про вимірювання відстані кожним із  $k$  датчиків;  $\{Ch_1|G\}-\{Ch_k|G\}$  являє собою сукупність апріорних характеристик  $k$  датчиків за умови наявності критеріальної характеристики  $G$ , за якої може бути здійснена селекція достовірних результатів вимірювання.

Відповідно до моделі (6), кожна ознака  $R_1-R_k$  характеризує одне й те саме значення виміру відстані. Якщо уявити, що система складається з  $k$  ідеальних ультразвукових датчиків, кожен із яких на всьому діапазоні вимірювання дає змогу отримати абсолютно достовірний результат, то

$$R_1 = R_2 = \dots = R_k. \quad (7)$$

Однак у випадку реальних датчиків на кожній відстані отримують результати вимірювання

з різною достовірністю, тому вираз (7) набуде вигляду

$$R_1 \approx R_2 \approx \dots \approx R_k. \quad (8)$$

Ступінь наближення до достовірного результату для кожного датчика на різній відстані буде різним.

Таким чином, для розв'язання задачі визначення достовірного результату в усьому загальному діапазоні системи вимірювання  $\Delta L$  пропонується використати характеристики розподілу точності вимірювання від відстані. Така характеристика визначається апріорно для кожного датчика, виходячи з його типу та на основі технічної документації. Виконані дослідження широкого спектра ультразвукових датчиків показали, що розподіл точності вимірювання в усьому діапазоні, за незначним наближенням, можна представити як нормальний розподіл. Якщо ймовірнісні характеристики отримання достовірного результату для кожного датчика представити в одній системі, то характеристика розподілу ймовірності отримання достовірного результату вимірювання відстані для всієї системи з  $k$  ультразвукових датчиків буде подана у вигляді, наведеному на рис. 5. В реальних умовах реалізації системи вимірювання задачею експерта є визначення мінімально допустимого рівня достовірності результату вимірювання, що на рис. 5 показаний як  $p_a$ . Відповідно до цього стає можливим визначення допустимих діапазонів вимірювання для кожного датчика ( $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_k$ ). Максимальна точність вимірювання для кожного датчика прямує до одиниці. Таким чином, припустимі характеристики точності можуть бути отримані у діапазоні  $[p_a, 1)$ .

В інформаційній системі алгоритм отримання найбільш достовірного результату (той, що належить діапазону  $[p_a, 1)$  та має найбільше можливе значення в цьому діапазоні) можна скласти завдяки апріорній побудові уздовж усього діапазону вимірювання лінії отримання достовірних результатів вимірювання. Ця лінія фактично визначає критеріальну характеристику  $G$ , за якою здійснюється селекція достовірного значення виміру. Визначення цієї лінії можливе через порівняння значень функцій розподілу  $p_k(R)$  для кожного датчика. Якщо достовірний результат вимірювань позначити  $R$ , то критерій селекції цього значення буде визначатися так:

$$\forall R_i, R_i \in \Delta L \Leftrightarrow \exists R_i = R, p_i(R_i) = \max p_i(R). \quad (9)$$

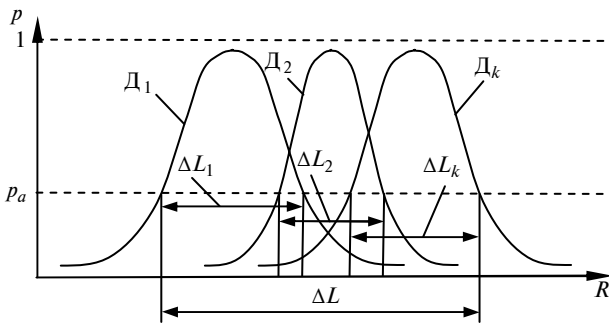


Рис. 5. Розподіл імовірностей отримання достовірного результату вимірювань системою ультразвукових датчиків

Визначення лінії отримання достовірних результатів вимірювань проілюстровано на рис. 6. Вона буде складатися з відрізків  $\Delta L'_1, \Delta L'_2, \dots, \Delta L'_k$ , які є частинами визначених раніше діапазонів датчиків  $\Delta L'_1, \Delta L'_2, \dots, \Delta L'_k$ . Відповідно до (9), серед отриманих вимірів  $R_1 - R_k$  датчиків  $D_1 - D_k$  найбільш достовірним значенням  $R$  буде вважатися вимір  $R_i$  датчика  $D_i$ , для якого при поточному значенні забезпечується максимум функції розподілу.

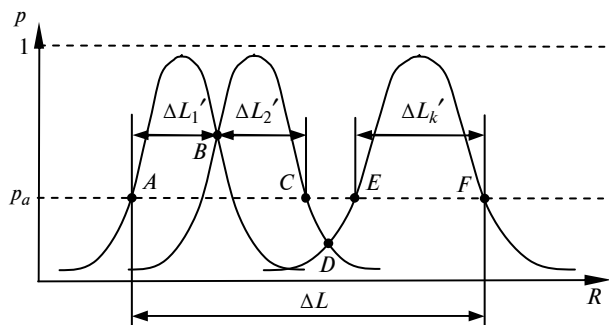


Рис. 6. Визначення лінії отримання достовірних результатів вимірювань у системі ультразвукових датчиків

Однак у цьому випадку побудова безперервної лінії отримання достовірних результатів вимірів можлива тільки за умови перекриття локальними діапазонами вимірювань датчиків усього діапазону  $\Delta L$ . Так, згідно з прикладом, поданим на рис. 6, лінія отримання достовірних результатів буде проходити від точки  $A$  до точки  $B$ , далі від точки  $B$  до  $C$  та від  $E$  до  $F$ . У діапазоні  $AB$  результат селекції буде вказувати на селекцію достовірного результату, який відповідає датчику  $D_1$ , у діапазоні  $BC$  – датчику  $D_2$ , а для діапазону  $EF$  – датчику  $D_k$ .

Слід зазначити, що при практичному застосуванні запропонованої інформаційної тех-

нології автоматизованої обробки даних та селекції достовірного результату вимірювання може скластися ситуація, коли під час синтезу не буде забезпечуватися безперервність лінії  $AF$  в усьому діапазоні  $\Delta L$ . Такий випадок також проілюстровано на рис. 6, з якого видно, що в діапазоні  $CE$  неможливо отримати достовірний результат, оскільки область в околі точки  $D$  лежить нижче мінімально допустимого рівня достовірності результату вимірювання. Це дає змогу здійснювати автоматичне визначення кількості необхідних датчиків з відповідним діапазоном. У випадку коректного синтезу системи ультразвукового вимірювання необхідно обов'язково виконати такі умови:

$$\begin{aligned}
 & p(A) \in [p_a, 1) \wedge p(B) \in [p_a, 1) \wedge p(C) \in \\
 & \in [p_a, 1) \wedge \dots \wedge p(D) \in [p_a, 1) \wedge \dots \wedge p(E) \in \\
 & \in [p_a, 1) \wedge p(F) \in [p_a, 1). \quad (10)
 \end{aligned}$$

Якщо умова (10) не виконується, то вибрана кількість датчиків не дає змоги із заданим рівнем  $p_a$  перекрити весь діапазон  $\Delta L$ . Рациональним є введення до системи датчика, для якого максимально достовірний результат вимірювання збігається з точкою мінімуму діапазону розриву лінії отримання достовірних результатів вимірів  $R_{\text{ecc}}$ . Критерій визначення такої точки  $R_{\text{ecc}}$  має вигляд

$$\begin{aligned}
 & \forall R_i, p_i(R_i) \notin [p_a, 1) \Leftrightarrow \exists R_i = R_{\text{ecc}}, \\
 & p_i(R_i) = \min p_i(R). \quad (11)
 \end{aligned}$$

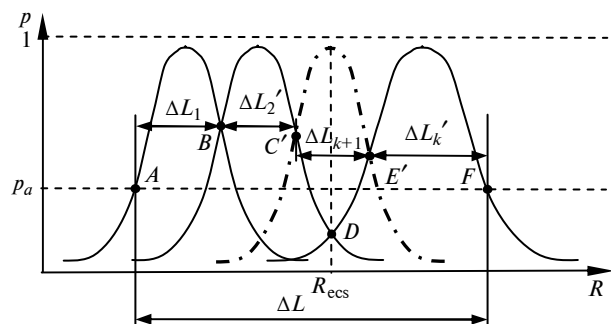


Рис. 7. Усунення розриву лінії отримання достовірних результатів вимірювань через введення додаткового датчика

На рис. 7 проілюстровано процес усунення розриву лінії отримання достовірних результатів вимірювань за рахунок введення  $k+1$ -го датчика з максимумом, що збігається з точкою  $R_{\text{ecc}}$ .

Введення до системи  $k+1$ -го датчика привело до зміни граничних точок  $C$  і  $E$  (згідно з рис. 5) на точки  $C'$  і  $E'$  відповідно. Таким чином, скорегована лінія отримання достовірних результатів вимірювання буде проходити через послідовність точок  $A, B, C', E', F$  та повністю відповідатиме умові безперервності у всьому діапазоні  $\Delta L$ , що в свою чергу буде складатися з діапазонів вимірювання датчиків:  $\Delta L'_1, \Delta L'_2, \dots, \Delta L'_{k+1}, \dots, \Delta L'_k$ .

### Висновки

Аналіз принципів побудови ультразвукових систем вимірювання вказав на складність їх технічної та алгоритмічної реалізації у випадку використання датчиків із роздільними приймачем та передавачем. З іншого боку, використання датчиків із суміщеними передавачем і приймачем дає можливість спростити реалізацію, але вимагає впровадження спеціальних структурно-алгоритмічних заходів щодо підвищення точності та розширення діапазону вимірів.

### Список літератури

1. *Жданкин В.К.* Ультразвуковые датчики для систем управления // Современные технологии автоматизации. – 2003. – № 1. – С. 68–79.
2. *Жданкин В.К.* Приборы для измерения уровня // Там же. – 2003. – № 7. – С. 97–100.
3. *Аш Ж.* Датчики измерительных систем. – М.: Мир, 1992. – Кн. 1. – 480 с.
4. *F. Cauty and Ch. Erades,* “Ultrasound measurement methods: errors, noise, and sensitivity”, *J. on Combustion, Explosion and Shock Waves*, vol. 36, no. 1, pp. 54–61, 2008.
5. *P.R. Hoskins et al.,* *Diagnostic ultrasound.* Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 260 p.
6. *Рябенский В.М., Захожай О.И.* Комбинированные системы распознавания образов // Проблемы информационных технологий. – 2011. – № 1 (9). – С. 156–160.
7. *Захожай О.И.* Информационная технология распознавания образов в задачах автоматизированной обработки информации и управления сложными системами // Там же. – 2013. – № 1 (13). – С. 61–68.
8. *Захожай О.И.* Селекция рациональной совокупности образов в комбинированных системах распознавания // Электротехнические та комп'ютерні системи. – 2013. – № 9 (85). – С. 186–192.

Рекомендована Радою  
Навчально-наукового комплексу  
“Інститут прикладного системного  
аналізу” НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
6 жовтня 2014 року