

## МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

А. О. Коваль<sup>1</sup>, О. А. Коваль<sup>2</sup>, Я. С. Медведовська<sup>3</sup>, Д. Є. Петрукович<sup>4</sup>, Н. В. Діденко<sup>5</sup>, С. Д. Янушкевич<sup>6</sup>, А. В. Лебединський<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, [koval\\_andrey79@ukr.net](mailto:koval_andrey79@ukr.net)

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, [koval\\_al@ukr.net](mailto:koval_al@ukr.net)

<sup>3</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, [yana.brovko@ukr.net](mailto:yana.brovko@ukr.net)

<sup>4</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, [petrukov110@ukr.net](mailto:petrukov110@ukr.net)

<sup>5</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, [nataly.v.didenko@gmail.com](mailto:nataly.v.didenko@gmail.com)

<sup>6</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, [ianushkevych.sergii@yandex.ua](mailto:ianushkevych.sergii@yandex.ua)

<sup>7</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, [zoops0mania@gmail.com](mailto:zoops0mania@gmail.com)

### Анотація

У роботі наведено основні результати досліджень невизначеності відновлення динамічних характеристик вимірювальних каналів за даними поточних вимірювань в просторово розподілених інтелектуальних вимірювальних інформаційних системах. Метою досліджень є розробка методу оцінювання невизначеності відновлення перехідної характеристики вимірювальних каналів тиску нейромережевим методом в просторово розподілених інтелектуальних вимірювальних інформаційних системах.

Показано, що в результаті "старіння" елементів вимірювальних каналів за три роки відхилення динамічних характеристик від номінальних значень може сягати 15%, що в свою чергу призводить як до зростання динамічних похибок вимірювання тиску в 1,5 раз та збільшення постійної часу вимірювального каналу з 80 мс до 240 мс.

Встановлено, що використання нейромережевих методів для відновлення поточної перехідної характеристики вимірювальних каналів тиску дозволяє частково вирішити завдання і зменшити її відхилення від номінальних значень з 15% до 8%. Використання адаптивних порогів невизначеності вихідних сигналів вимірювальних каналів дозволяє врахувати перехідні процеси, що викликані зміною режиму роботи об'єкта вимірювання, отримувати усереднені динамічні характеристики, значно зменшити вплив нестационарності вимірюваного процесу та його відношення сигнал/шум на невизначеність відновлених динамічних характеристик вимірювального каналу за даними поточних вимірювань.

**Ключові слова:** невизначеність, вимірювальний канал, відновлення, динамічні характеристики, інтелектуальна вимірювальна інформаційна система, поточні вимірювання.

### Вступ

Сьогодні, в зв'язку з необхідністю комплексного вирішення завдань діагностики та оптимального управління технічно складними об'єктами, все більше поширення набувають просторово розподілені інтелектуальні вимірювальні системи. Характерним для просторово розподілених вимірювальних систем є те, що в них структурні елементи (вимірювальні лінії, датчики, системи збору і обробки вимірювальної інформації, повнофункціональні об'єктові вимірювальні канали та системи) розподілені в просторі і знаходяться не тільки на значній відстані один від одного а і працюють в різних умовах (температура, вологість, вібрація, радіаційні та електромагнітні випромінювання, індустриальні завади). Різні умови експлуатації вимірювальних каналів є причиною появи неідентичності їх динамічних характеристик (перехідних та імпульсних характеристик) в результаті різного рівня "старіння" насамперед таких конструктивних елементів як

вимірювальні лінії та датчики. Внаслідок "старіння" вимірювальних каналів зростає їх інерційність (постійна часу) та динамічні похибки вимірювань. Стає актуальним завдання усунення неідентичності вимірювальних каналів просторово розподілених вимірювальних систем. Міроприємства з метрологічного забезпечення експлуатації вимірювальних систем на технічно складних об'єктах (періодична чистка вимірювальних ліній та перевірка датчиків) не дозволяють в повній мірі вирішити це завдання, так як в процесі їх виконання контролюються лише статичні характеристики датчиків. Динамічні характеристики як окремих елементів так і вимірювальних каналів в цілому не визначаються і не контролюються. Це насамперед пов'язано з труднощами (а в більшості випадків і неможливістю) формування вхідних тестових сигналів для визначення динамічних характеристик за даними поточних вимірювань.

Таким чином має місце проблема визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів в просторово розподілених вимірювальних системах за даними поточних вимірювань. Одним із шляхів вирішення проблеми з визначення та відновлення динамічних характеристик вимірювальних каналів в просторово розподілених вимірювальних системах за даними поточних вимірювань є використання інтелектуальних вимірювальних інформаційних систем на основі нейронних мереж.

Дослідження динамічних вимірювань в останні роки активно проводяться провідними вченими в цій галузі.

В роботах С. І. Кондрашова та ін. [1, 2] розроблено спосіб формування тестового сигналу для контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів з метою визначення динамічних характеристик (ДХ) аналогової частини вимірювальних каналів систем, сформованих на основі нормуючих перетворювачів з статичною характеристикою або перетворювачів з силовою компенсацією, які мають у своєму складі нормуючий підсилювач. Але даний спосіб може бути реалізований лише на випробувальних стендах.

У роботах О. Г. Олександрова, О. О. Єгоршина, О. О. Костоглотова та О. В. Крузнера [3, 4, 5, 6] розглянуті моделі вимірювальних перетворювачів, що дозволяють відновити спотворений сигнал і одержати оцінку похибки вимірювань. У таких моделях вимірювальних перетворювачів настроювані параметри суттєво зменшують динамічну похибку вимірювань. Однак лінійні методи управління настроюваними параметрами моделі перетворювача за своїми можливостями мають обмеження. Так, вони не дозволяють змінювати в процесі роботи моделі ні алгоритм вимірювання, ні структуру датчика, ні адаптуватися до зовнішніх впливових факторів та технічного стану датчика в масштабі часу близькому до реального. Використання більш ефективних методів моделювання датчиків вимагає комплексного підходу до вирішення поставлених проблемних питань. Одним із таких підходів є використання нейронних мереж для розробки динамічних моделей первинних вимірювальних перетворювачів та вимірювальних каналів.

На цей час нейронні мережі в метрології використовуються для вирішення завдань ідентифікації об'єктів вимірювання та діагностики і управління в розгалужених вимірювальних інформаційних системах. Цим напрямком нейромережевих технологій присвячені роботи J. Korbicz, D. Materassi, Tan P. V., Saggin B., Cessac B. [7, 8, 9, 10, 11]. Нейромережеві технології стосовно розв'язання оберненої задачі в цих роботах досліджені досить детально. Запропонований метод статистичної регуляризації при розв'язанні оберненої задачі. Метод вимагає знання законів розподілу вимірюваного сигналу та перешкод, що є досить жорстким обмеженням.

У роботах І. П. Іщука [12], О. В. Калача [13], П. В. Кобякова та ін. [14] і О. В. Дегтярева та ін. [15] розглянуто використання нейронних мереж для багатофакторних вимірювань при ідентифікації

змінних на лініях невизначеності та для обробки сигналів датчиків, ідентифікації нелінійних динамічних засобів вимірювань. Проаналізовано використання архітектур термопальних мереж в вимірювальних інформаційних системах. Розглянуті нейромережеві технології в даних роботах дозволяють проводити ідентифікацію та обробку вимірювальної інформації не в процесі вимірювань, а в процесі подальшої обробки вимірювальної інформації в спеціалізованих інформаційних мережах.

Нейромережеві алгоритми прогнозування та оптимізації вимірювальних систем на етапі їх розробки досліджені О. В. Назаровим [16]. Методика вибору структури нейрорегулятора в динамічній вимірювальній системі розглянута в роботі В. І. Васильєва [17]. В цих роботах досліджено використання нейромережевих технологій лише в процесі розробки вимірювальних інформаційних систем.

Використання нейронних мереж у процесі калібрування датчиків детально досліджені у роботах Р. D. Wasserman [18], D. A. Khrobostov [19] та С. В. Водотики [20]. Ці дослідження проведені з використанням спеціалізованого стендового обладнання на якому калібруються датчики. При цьому не враховуються впливові фактори, які діють на датчик у процесі експлуатації.

Огляд літератури з методів визначення динамічних характеристик (ДХ) датчиків та вимірювальних каналів показав що: у всіх розглянутих методах зовсім не оцінюється невизначеність вихідних сигналів та відновлених динамічних характеристик; методи не дозволяють визначити невизначеність ДХ вимірювальних каналів в процесі їх експлуатації за даними поточних вимірювань і не враховують вплив "старіння" елементів вимірювальних каналів на рівень невизначеності їх вихідних сигналів. У зв'язку з цим перспективним напрямком в області теорії динамічних вимірювань є розробка методів оцінки невизначеності відновлених ДХ вимірювальних каналів в просторово розподілених інтелектуальних вимірювальних інформаційних системах.

### **Постановка завдання**

Мета даного дослідження полягає в розробці методу оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик в просторово розподілених інтелектуальних вимірювальних інформаційних системах.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати наступні завдання: провести оцінку невизначеності вихідних сигналів вимірювальних каналів тиску; на основі отриманих оцінок невизначеності вихідних сигналів вимірювальних каналів тиску розробити метод оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик в просторово розподілених інтелектуальних вимірювальних інформаційних системах.

Метод ґрунтується на результатах експериментальних досліджень та імітаційного моделювання проведеного на кафедрі метрології та

безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

### Дослідження впливу терміну експлуатації вимірювального каналу на невизначеність вимірювань його вихідного сигналу

Дослідження динамічних характеристик датчиків та вимірювальних каналів в просторово розподілених вимірювальних системах проводяться авторами вже протязі 6 років (з 2014 р.). В якості прикладу будемо розглядати просторово розподілену вимірювальну систему тиску. Аналіз результатів експериментальних досліджень [21-25] показав, що з ростом терміну

експлуатації вимірювального каналу (не дивлячись на те що всі заходи з метрологічного забезпечення виконувались у повному обсязі) змінюються статистичні характеристики вимірюваного тиску. На рис. 1 приведені гістограми вимірюваного тиску в вимірювальних каналах з термінами експлуатації: новий, 1 рік, 3 роки, 5 років, 7 років та 10 років. Було встановлено що розширення гістограм викликане зростанням внутрішніх шумів вимірювального каналу. Чим довше експлуатується вимірювальний канал – тим більше в ньому рівень шумів. Відповідні статистичні характеристики приведені на рис.2.

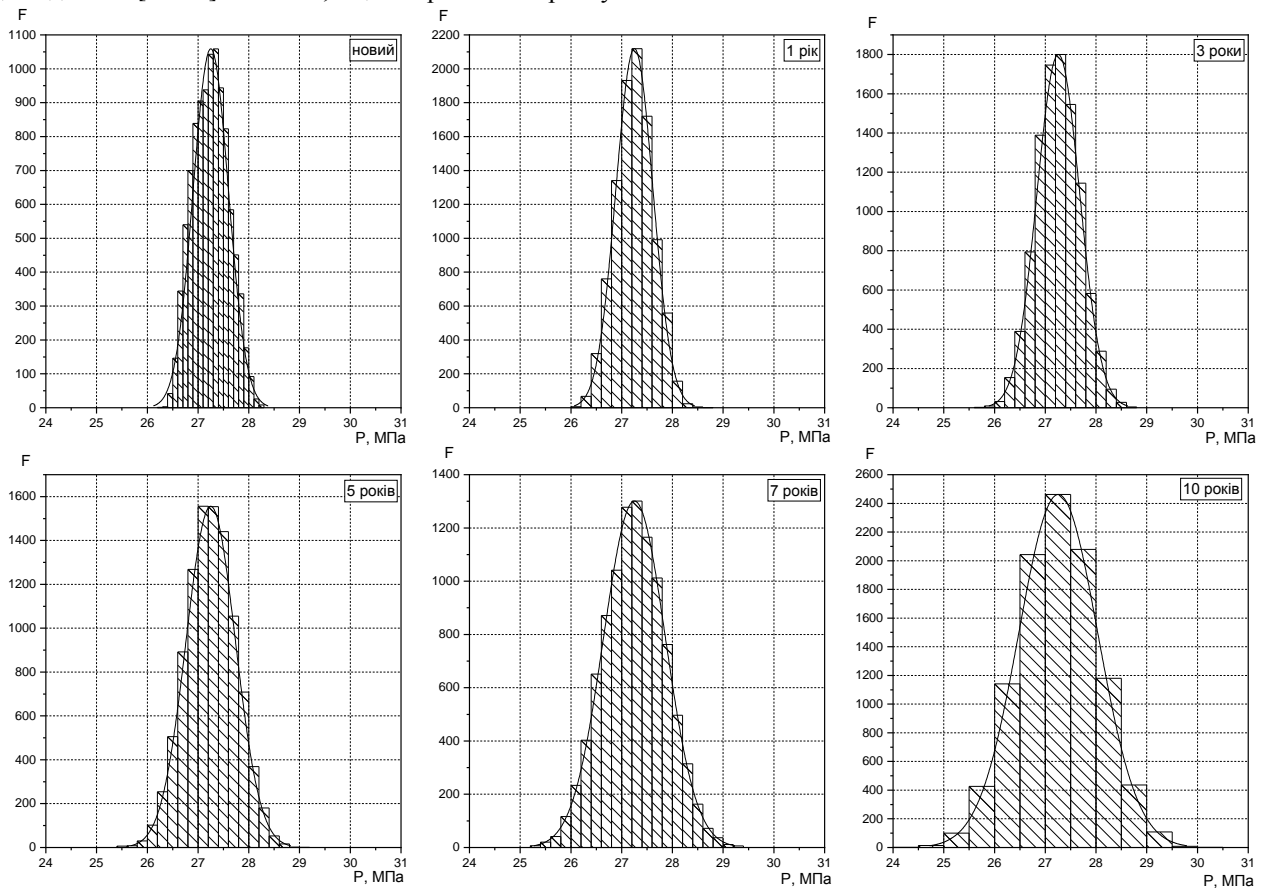


Рис. 1. Гістограми вимірюваних вихідних сигналів вимірювальних каналів тиску з різним терміном експлуатації

|    | N total | Mean     | Standard Deviation | SE of mean | Lower 95% CI of Mean | Upper 95% CI of Mean | Minimum  | Median   | Maximum  |
|----|---------|----------|--------------------|------------|----------------------|----------------------|----------|----------|----------|
| 0  | 10001   | 27,25075 | 0,34799            | 0,00348    | 27,24393             | 27,25758             | 26,23279 | 27,2532  | 28,28089 |
| 1  | 10001   | 27,25163 | 0,3663             | 0,00366    | 27,24445             | 27,25881             | 26,12176 | 27,25278 | 28,61735 |
| 3  | 10001   | 27,25736 | 0,42179            | 0,00422    | 27,24909             | 27,26563             | 25,70286 | 27,25424 | 28,77713 |
| 5  | 10001   | 27,24935 | 0,48608            | 0,00486    | 27,23982             | 27,25887             | 25,48899 | 27,24885 | 29,04269 |
| 7  | 10001   | 27,25212 | 0,6092             | 0,00609    | 27,24018             | 27,26406             | 25,20342 | 27,25008 | 29,37395 |
| 10 | 10001   | 27,2562  | 0,77972            | 0,0078     | 27,24092             | 27,27148             | 24,47115 | 27,24622 | 30,29834 |

Рис. 2. Статистичні характеристики вихідних сигналів вимірювальних каналів тиску з різним терміном експлуатації

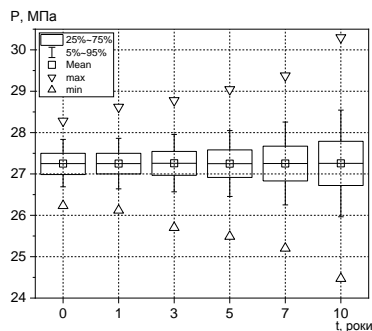


Рис. 3. Динаміка зміни статистичних характеристик вимірювального каналу тиску

Дослідження показали, що якщо термін експлуатації вимірювального каналу  $t$  становить від 1 до 3 років, то незалежно від діапазону зміни вихідного сигналу  $P_e/P_n$  датчика ріст основної похибки вимірювань  $\Delta\gamma_c < \pm 0,01\%$ . Для вимірювального каналу з 10 річним терміном експлуатації

$\pm 0,17\% \leq \Delta\gamma_c \leq \pm 0,45\%$ , а це близько до межі допустимої основної похибки вимірювань  $\gamma_c < \pm 0,5\%$ .

Таким чином, основний вплив процесу "старіння" вимірювального каналу тиску на його статичну функцію перетворення полягає в її зсуві і як наслідок в зростанні відносної допустимої похибки вимірювань тиску та появи дрейфу цієї похибки в часі (рис. 4).

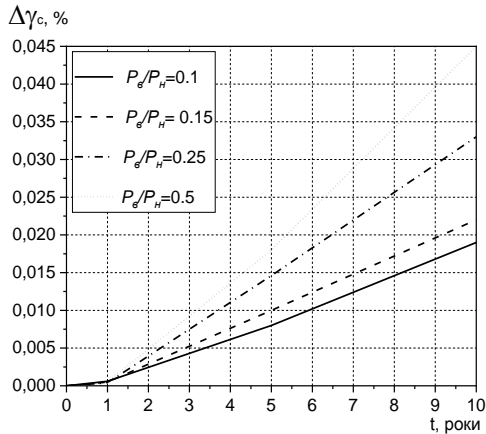


Рис. 4. Залежність зміни основної похибки вимірювань вимірювальних каналів тиску від терміну їх роботи

Подальші дослідження показали, що основною причиною зростання внутрішніх шумів вимірювального каналу тиску (ВКТ) в процесі його експлуатації є деградаційні процеси в елементах каналу (вимірювальних лініях та датчиках). Визначені експериментально усереднені перехідні характеристики (ПХ)  $H(t)$ , які приведені на рис. 5 це підтверджують.

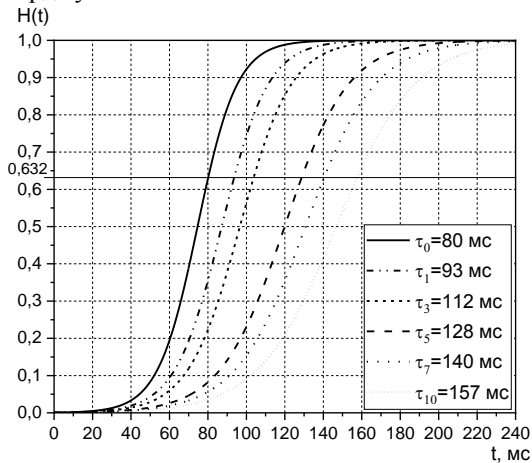


Рис. 5. Усереднені перехідні характеристики  $H(t)$  вимірювальних каналів тиску

Постійні часу вимірювальних каналів тиску  $\tau_{вк}$  визначались за їх ПХ. Так усереднені постійні часу  $\tau_{вк}$  для ВКТ з термінами експлуатації 0, 1, 3, 5, 7 та 10 років відповідно становили  $\tau_{вк0} = 80$  мс,  $\tau_{вк1} = 93$  мс,  $\tau_{вк3} = 112$  мс,  $\tau_{вк5} = 128$  мс,  $\tau_{вк7} = 140$  мс,  $\tau_{вк10} = 157$  мс (рис. 5). За отриманими

експериментальними даними була встановлена залежність ПХ вимірювального каналу  $H(t)$  від терміну його експлуатації:

$$H(t) = 1 - \frac{1}{1 + k_t \cdot e^{\frac{t}{k_s}}}, \quad (1)$$

де  $k_s$  – експлуатаційний коефіцієнт перехідної характеристики, який враховує її "старіння";

$k_t = 7 \cdot 10^{-4}$  – коефіцієнт затримки перехідної характеристики.

Експлуатаційні коефіцієнти перехідної характеристики для різних термінів роботи вимірювальних каналів приведені в табл. 1.

Таблиця 1  
Експлуатаційні коефіцієнти перехідної характеристики

| Коефіцієнт | Термін роботи, років |    |      |      |    |      |
|------------|----------------------|----|------|------|----|------|
|            | 0                    | 1  | 3    | 5    | 7  | 10   |
| $k_s$      | 10,27                | 12 | 13,3 | 16,5 | 18 | 20,2 |

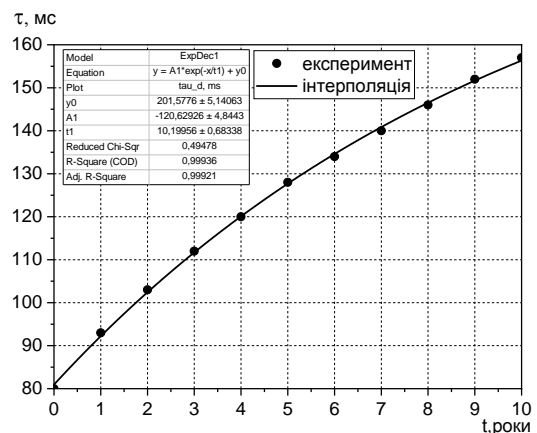


Рис. 6. Вплив "старіння" вимірювального каналу на його постійну часу

Експериментально отримана залежність постійної часу ВКТ  $\tau_{вк}$ , яка приведена на рис. 6 була інтерпольована виразом:

$$\tau(t) = 201,6 - 120,6 \cdot e^{-\frac{t}{10,2}}. \quad (2)$$

Невизначеність вимірюваного тиску в вимірювальних каналах за даними поточних вимірювань визначалась за типом В. Для цього спочатку визначались вибіркові середньоквадратичні відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (p_k - m)^2}{n-1}}, \quad m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n p_k, \quad (3)$$

де  $p_k$  – поточне значення вимірюваного тиску;  
 $n = 100000$  – кількість вимірів у часовій вибірці;

На рис. 7 приведені вибіркові середньоквадратичні відхилення ВКТ з різним терміном експлуатації. Вираз для інтерполяції даних експериментів має наступний вид:

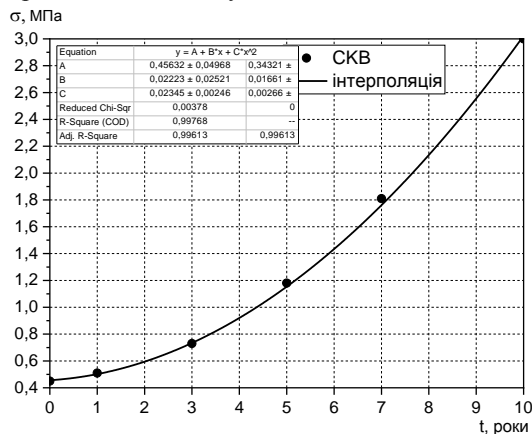


Рис. 7. Вибіркові середньоквадратичні відхилення ВКТ з різним терміном експлуатації

$$\sigma(t) = 0,456 + 0,022 \cdot t + 0,02345 \cdot t^2. \quad (4)$$

Невизначеність типу В визначалась за виразом:

$$u_B = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

Для вимірювальних каналів з різним терміном експлуатації  $u_B$  буде різною. На рис. 8 приведена залежність  $u_B(t)$ . Аналітичний вираз для  $u_B(t)$  отриманий за інтерпольованою кривою рис. 8 має вид

$$u_B(t) = 0,0044 + 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot t + 2,18 \cdot 10^{-4} \cdot t^2. \quad (6)$$

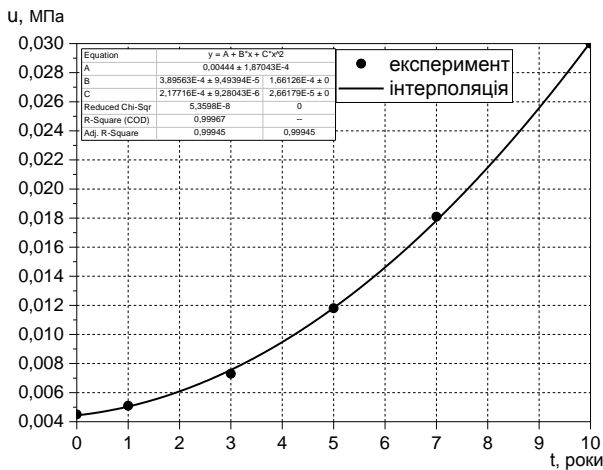


Рис. 8. Залежність невизначеності типу В від терміну експлуатації вимірювального каналу

Отримані були також межі невизначеності  $\Delta u_B(t)$  вимірюваного тиску на виході ВКТ, які приведені на рис. 9 і визначались згідно з виразом:

$$\Delta u_B(t) = m \pm u_B(t). \quad (7)$$

Аналіз залежностей  $u_B(t)$  (рис. 8) та  $\Delta u_B(t)$  (рис. 9) показує, що з ростом терміну експлуатації ВКТ росте і невизначеність  $u_B$  вимірювань тиску на його виході.

В процесі вивчення впливу рівня "старіння" ВКТ на невизначеність  $u_B$  вимірювань тиску на його виході досліджувались 5 каналів з різним рівнем тиску.

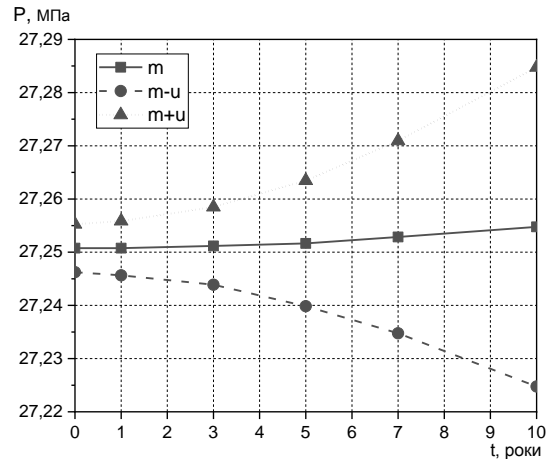


Рис. 9. Межі невизначеності типу В вимірювального каналу тиску

В якості прикладу на рис. 8 та рис. 9 приведені результати тільки для одного ВКТ, але загальною є закономірність зростання невизначеності  $u_B$  вимірювань тиску на його виході ВКТ з ростом терміну експлуатації. Таким чином, проведені дослідження дозволили в якості критерія рівня "старіння" ВКТ прийняти невизначеність типу В результатів поточних вимірювань тиску  $u_B$  (5).

### Розробка методу оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик вимірювальних каналів в інтелектуальних просторово розподілених вимірювальних інформаційних системах

Грунтуючись на результатах експериментальних досліджень впливу процесу "старіння" ВКТ на його динамічні характеристики та критерію рівня його "старіння" (5) був розроблений метод оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик в інтелектуальних просторово розподілених вимірювальних інформаційних системах. Сутність методу полягає в знаходженні мінімуму невизначеності відновленої перехідної характеристики вимірювального каналу тиску за мінімумом невизначеності поточних вимірювань тиску на його виході за допомогою нейронної мережі.

На рис. 10 приведена структурна схема, яка реалізує метод оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик (зокрема перехідної характеристики ВКТ) в інтелектуальній просторово розподіленій вимірювальній інформаційній системі.

Проведені авторами дослідження [24, 25, 26] показали що для вирішення поставленого завдання найбільш підходить тришарова нейронна мережа

зворотнього поширення з чотирма входними активаціями перцептронами та сигмоїдальними функціями

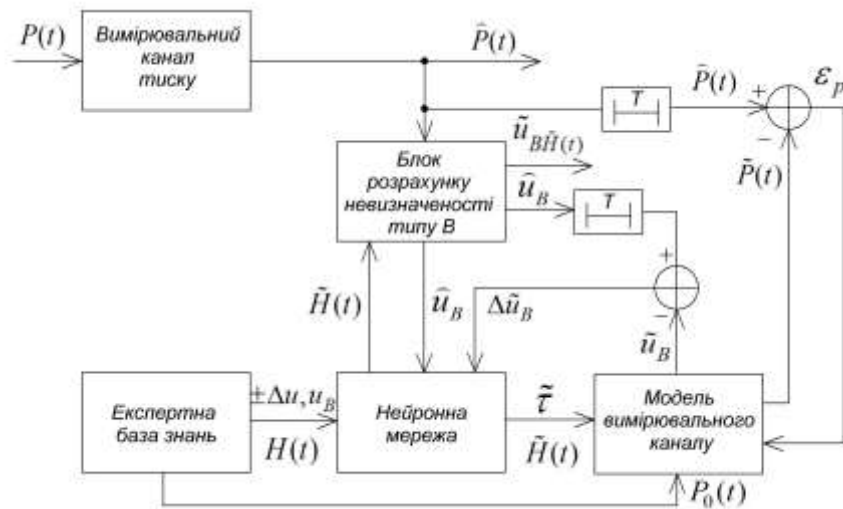


Рис. 10. Схема методу оцінювання невизначеності відновлення перехідної характеристики ВК в інтелектуальній просторово розподіленій вимірювальній інформаційній системі

Завданням нейронної мережі є визначення вектору поточної перехідної характеристики ВКТ  $\tilde{\mathbf{H}}(t)$  та його постійної часу  $\tilde{\tau}$  за поточною оцінкою невизначеності типу В  $\tilde{u}_B$  його вихідного вектору вимірюваного тиску  $\hat{\mathbf{P}}(t)$ .

На вхід нейронної мережі з експертної бази знань подаються:

- вектор перехідної характеристики ВКТ з нульовим терміном експлуатації  $\mathbf{H}(t)$ ;

- вектор невизначеності типу В  $\mathbf{u}_B$  вихідного сигналу ВКТ розрахований за виразом (6) для різних термінів експлуатації, він є навчальною вибіркою за якою навчається нейронна мережа;

- вектор меж невизначеності  $\pm\Delta\mathbf{u}$  розрахований за виразом (7) для різних термінів експлуатації ВКТ;

- оцінка невизначеності типу В  $\tilde{u}_B$  вихідного сигналу розрахована за даними поточних вимірювань тиску  $\hat{\mathbf{P}}(t)$ ;

- різниця  $\Delta\tilde{u}_B$  оцінок невизначеності  $\tilde{u}_B$  вихідного вектора вимірюваного тиску  $\hat{\mathbf{P}}(t)$  та невизначеності  $\tilde{u}_B$  вихідного вектора тиску  $\tilde{\mathbf{P}}(t)$  модельного (опорного) каналу тиску. Мінімум  $\Delta\tilde{u}_B$  прийнято в якості критерія закінчення навчання нейронної мережі.

Робота схеми (рис. 10), яка реалізує метод оцінювання невизначеності відновлення перехідної характеристики ВКТ полягає в наступному. На вхід ВКТ подається вимірюваний процес тиску  $P(t)$ . В результаті процедури вимірювань на виході ВКТ отримуємо вектор поточних вимірювань тиску  $\hat{\mathbf{P}}(t)$ . Розмірність вектора  $\hat{\mathbf{P}}(t)$  визначається як часом вимірювань так і інтервалом стаціонарності

вимірюваного процесу  $P(t)$ . За поточними значеннями вектору  $\hat{\mathbf{P}}(t)$  в блоці розрахунку невизначеності типу В отримується оцінка поточної невизначеності вимірювань  $\tilde{u}_B$  вектору  $\hat{\mathbf{P}}(t)$ . Значення  $\tilde{u}_B$  подається на вхід нейронної мережі. Нейронна мережа на основі критерію "старіння" ВКТ, в якості якого прийнята оцінка поточної невизначеності вимірювань  $\tilde{u}_B$ , навчальної вибірки  $\mathbf{u}_B$  [27], вектора меж невизначеності  $\pm\Delta\mathbf{u}$  та опорного вектора перехідної характеристики ВКТ  $\mathbf{H}(t)$  формує вектор поточної (характерної для поточного терміну експлуатації) перехідної характеристики ВКТ  $\tilde{\mathbf{H}}(t)$  та визначає його поточну постійну часу  $\tilde{\tau}$ . В основу формування вектора  $\tilde{\mathbf{H}}(t)$  покладено принцип рангової порогової обробки. Її суть полягає в тому що вектори  $\mathbf{u}_B$  та  $\pm\Delta\mathbf{u}$ , які на етапі створення експертної бази знань розраховуються відповідно за формулами (6) і (7), та розміщуються за рангом:

$$\text{rang}(\mathbf{u}_B) = \|\text{rang}(u_{B_i})\|, \quad (8)$$

$$\text{rang}(\pm\Delta\mathbf{u}) = \|\text{rang}(\pm\Delta u_i)\|, \quad (9)$$

де  $i = 0 \dots 10$  – кількість років експлуатації ВКТ.

Ранги  $\text{rang}(u_{B_i})$  та  $\text{rang}(\pm\Delta u_i)$  – це номери елементів  $u_{B_i}$ ,  $\pm\Delta u_i$  векторів  $\mathbf{u}_B$  і  $\pm\Delta\mathbf{u}$ , які присвоюються в порядку їх зростання. Таким чином номер елементу вектора (його індекс) відповідає відповідному терміну експлуатації ВКТ. Нейронна мережа порівнює оцінку поточної невизначеності вимірювань  $\tilde{u}_B$  тиску на виході ВКТ з рангами  $\text{rang}(\mathbf{u}_B)$  та  $\text{rang}(\pm\Delta\mathbf{u})$ . За результатами цієї рангової

порогової обробки нейронна мережа визначає поточний термін експлуатації ВКТ. За визначеним терміном експлуатації згідно з виразами (1) та (2) нейронна мережа визначає вектор поточної перехідної характеристики ВКТ  $\tilde{\mathbf{H}}(t)$  та його постійну часу  $\tilde{\tau}$ .

Отриманий вектор  $\tilde{\mathbf{H}}(t)$  передається в блок розрахунку невизначеності типу В де визначається оцінка невизначеності типу В відновлення перехідної характеристики ВКТ  $\tilde{u}_{BH(t)}$ .

Для оцінки ефективності запропонованого методу оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик пропонується два критерії:

— критерій  $U$  – мінімуму різниці  $\Delta\tilde{u}_B$  оцінок невизначеності  $\tilde{u}_B$  вихідного вектора вимірюного тиску  $\tilde{\mathbf{P}}(t)$  та невизначеності  $\tilde{u}_B$  вихідного вектора тиску  $\hat{\mathbf{P}}(t)$  опорного каналу тиску

$$U = \min(\Delta\tilde{u}_B) = \min(\tilde{u}_B - \hat{u}_B); \quad (10)$$

— критерій  $\varepsilon_p$  – мінімум вектора різниць між елементами вектора вимірюного тиску реального ВКТ  $\hat{\mathbf{P}}(t)$  та елементами вектора тиску  $\tilde{\mathbf{P}}(t)$  опорного каналу тиску.

$$\varepsilon_p = \min(\hat{\mathbf{P}}(t) - \tilde{\mathbf{P}}(t)). \quad (11)$$

Використання двох критеріїв –  $U$  та  $\varepsilon_p$  викликана наявністю наступних факторів:

1. В просторово розподілених вимірювальних інформаційних системах вимірюваний процес характеризується певною нестационарністю [24, 25, 26, 27], яка викликана насамперед динамічними режимами роботи об'єкта вимірювання. В повній мірі усунути цю нестационарність неможливо. Рівень залишків носить як суб'єктивний так і об'єктивний характер: він визначається як рівнем підготовки дослідника, так і можливостями програмного забезпечення, яке використовується, і становить від 6% до 8% [24].

2. Вихідний сигнал ВКТ складається з багатьох часових фрагментів сталих амплітуд, тривалість цих фрагментів різна і складає від одиниць секунд до 30 хв. Інтервал стаціонарності вихідного сигналу ВКТ визначається тривалістю часового фрагменту сталої амплітуди і лежить в межах від 5 с до 25 хв. [24].

3. Зміна динамічних режимів роботи приводить до різного рівня шумів вимірюваного процесу, який лежить в межах від 3 дБ до 16 дБ [24].

Наявність цих впливових факторів приводить до обмежень застосування запропонованого методу оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик ВКТ.

Комплексне використання двох критеріїв –  $U$  та  $\varepsilon_p$  дозволяє постійно контролювати як межі застосовності методу, так і проводити своєчасну корекцію параметрів моделі ВКТ для досягнення заданої точності відновлення перехідної характеристики ВКТ.

Даний метод був апробований на вимірювальному стенді на кафедрі метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Реалізація методу являє собою програмно апаратний комплекс виконаний в програмних середовищах LabView та Python. Результати роботи схеми (рис. 10) приведені на рис. 11 – рис. 13. На рис. 11 зображена залежність похибки навчання нейронної мережі від кількості циклів (epoch) навчання. Нейронна мережа успішно навчалась за 100 epoch, похибка навчання при цьому становила  $7 \cdot 10^{-4}$ . Тривалість епохи навчання залежала як від відношення сигнал/шум, так і від тривалості часової вибірки сигналу на виході ВКТ. Найкраще мережа навчалась при тривалості часової вибірки тиску на виході ВКТ 5 секунд та відношенні сигнал/шум більше 10 дБ. В цьому випадку тривалість епохи навчання склала близько 20 мс. Час необхідний на навчання нейронної мережі склав 2 с.

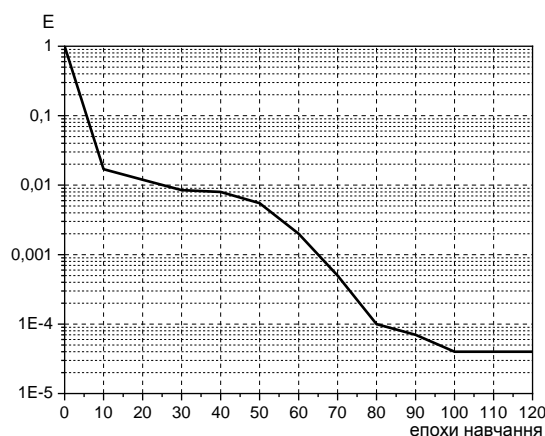


Рис. 11. Графік зміни похибки навчання залежно від кількості циклів (epoch) навчання

На рис. 12 приведена залежність невизначеності типу В відновлення перехідної характеристики ВКТ  $\tilde{u}_{BH(t)}$  від тривалості часової вибірки  $\hat{\mathbf{P}}(t)$ . Встановлено, тривалість часової вибірки повинна бути не менше ніж 2,5 с.

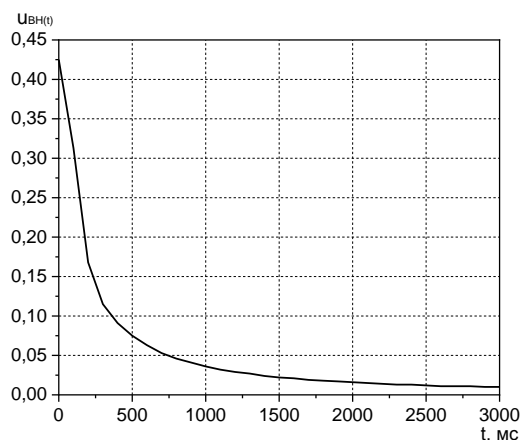


Рис. 12. Залежність невизначеності відновлення перехідної характеристики ВКТ від тривалості часової вибірки вимірюного тиску на його виході

Залежність невизначеності відновлення перехідної характеристики ВКТ від відношення сигнал/шум на його виході зображена на рис. 13. Встановлено, що мінімальне значення відношення сигнал/шум повинно становити не менше ніж 8 дБ.

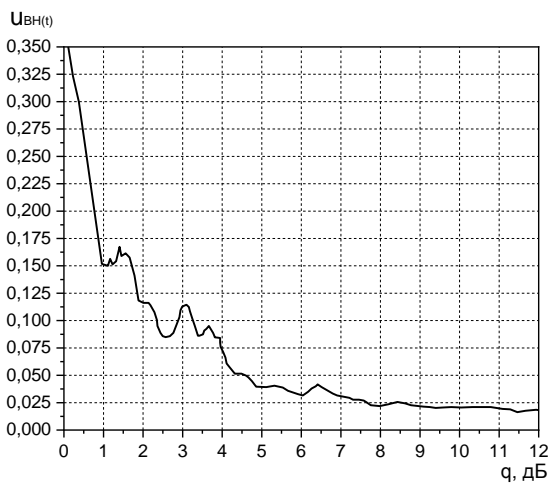


Рис. 13. Залежність невизначеності відновлення перехідної характеристики ВКТ від відношення сигнал/шум на його виході

Дослідження показали що запропонований метод має певні обмеження. Так він дозволяє відновлювати перехідну характеристику ВКТ за даними поточних вимірювань з невизначеністю  $\tilde{y}_{ВН(t)} \approx 0,025$  при відношенні сигнал/шум  $q > 8$  дБ та тривалістю часової вибірки вимірюваного сигналу на виході ВКТ не менше ніж 2,5 с. Рівень залишків нестационарності при цьому не повинен перевищувати 7%.

### Висновки

Запропонований метод, на відміну від відомих, дозволяє проводити оцінювання невизначеності відновлення перехідних характеристик вимірювальних каналів в просторово розподілених інтелектуальних вимірювальних інформаційних системах за даними поточних вимірювань – в процесі експлуатації. Він має як практичну так і наукову цінність.

Практична цінність даного методу полягає в тому, що він без значних матеріальних затрат та без виводу вимірювальних каналів з експлуатації дозволяє оперативно провести порівняльну оцінку рівня їх "старіння" в реальному масштабі часу. Отримані дані про поточний стан вимірювальних каналів просторово розподілених вимірювальних систем можуть бути корисними при плануванні та розробці заходів з оптимізації метрологічного забезпечення експлуатації вимірювальних систем на технічно складних об'єктах.

Наукова цінність методу оцінювання невизначеності відновлення динамічних характеристик вимірювальних каналів в інтелектуальних просторово розподілених вимірювальних інформаційних системах полягає в тому, що він є подальшим розвитком теорії динамічних вимірювань.

Даний метод дозволяє: розробляти нові та вдосконалювати існуючі методи зменшення невизначеності динамічних вимірювань, підвищення достовірності оцінки рівня "старіння" вимірювальних каналів та ідентифікації їх вихідних сигналів; оцінювати невизначеність вихідного сигналу опорного (моделі) вимірювального каналу і на основі отриманих оцінок розробляти нові методи та способи усунення неідентичності вимірювальних каналів викликаної їх різним "старінням"; коректувати дані експертної бази знань на основі статистики поточних вимірювань.

### Список літератури

1. Спосіб формування тестового сигналу для контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів: пат. 86669 Україна: МПК: G05B 23/00, G05B 23/02; заявл. 12.06.2007; опубл. 12.05.2009, Бюл. №9. 3 с.
2. Кондрашов С. І. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах : монографія. Харків : НТУ "ХПІ", 2004. 224 с.
3. Александров А. Г. Адаптивное управление с эталонной моделью при внешних возмущениях. *Автоматика и телемеханика*. 2004. №5. С. 77–91.
4. Егоршин А. О. Оптимизация параметров стационарных моделей в унитарном пространстве. *Автоматика и телемеханика*. 2004. №2. С. 29–49.
5. Костоготов А. А. Синтез интеллектуальных измерительных процедур на основе принципов регуляризации. *Измерительная техника*. 2001. №1. С. 8–12.
6. Крузнер А. Б. Восстановление входных сигналов средств измерений, описываемых линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами *Измерительная техника*. 1996. №42. С. 142–152.
7. Kuş J., J. Korbicz Artificial neural networks in fault diagnosis of dynamical. *Diagnostics of Processes*. 2013. P. 37–49.
8. Materassi D. Reconstruction of topologies for acyclic networks of dynamical systems. *Proc. of the American Control Conference*. 2014. P. 37–41.
9. Tan P. V., Millérioux G., Daafouz J. A contribution to the identification of switched dynamical systems over finite fields. *Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control*. 2013. P. 4429–4434.
10. Saggini B., Debei S., Zaccariotto M. Dynamic error correction of a thermometer for atmospheric measurements. *Measurement*. 2015. № 30. P. 223–230.
11. Cessac B. Neural Networks as dynamical systems. *International Journal of Bifurcations and Chaos*. 2014. №6. P. 1585–1629.
12. Ищук И. П. Многофакторные измерения при идентификации переменных на линиях неопределенности. *Метрология*. Москва. 2003. №12. С. 3–7.
13. Калач А. В. Применение метрологии искусственных нейронных сетей для обработки сигналов сенсоров. *Нейрокомпьютеры*. Москва. 2003. №10. С. 43–47.
14. Кобяков П. В., Малыхина Г. Ф. Анализ архитектур темпоральных сетей и их применение в информационных системах. *Датчики и системы: Сборник докладов международной конференции*. Том III. Москва. 2002. С. 140–144.
15. Дегтярев А. В., Запорожец О. В., Овчарова Т. А. Идентификация нелинейных динамических средств измерений с помощью искусственной нейронной сети. *Метрология та прилади*. Харків. 2013. №2. С. 85–89.



16. Назаров А. В. Лоскутов А. И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. Москва: Наука и Техника, 2003. 384 с.

17. Васильев В. И., Валева С. С., Шилоносков А. А. К выбору структуры нейрорегулятора в системе управления динамическим объектом. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. Москва. 2001. №4. С. 52–60.

18. Wasserman P. D. *Neural Computing: Theory and Practice*. 1989. 230 p.

19. Khrobotov D. A., Filaretov G. F. Sensor Calibration with Artificial Neural Network. *45th International Scientific Colloquium*. 2000. P. 2–7.

20. Водотыка С. В. Использование искусственных нейронных сетей при построении калибровочной зависимости средства измерения. *Системы обробки інформації*. Харків. 2011. №1. С. 24–28.

21. Коваль А. О., Полярус О. В. Використання методу шумів та online діагностики для вдосконалення метрологічного забезпечення на техногенно небезпечних об'єктах. *Вісник НТУ "ХПИ"*. Харків. 2015. №35. С. 152–156.

22. Коваль А. О. Прогнозування метрологічної надійності датчиків тиску на техногенно-небезпечних об'єктах. *I Всеукраїнська наук.-тех. конф. "Актуальні проблеми автоматики та приладобудування"*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Харків ННЦ "Інститут метрології". Харків. 2014. С. 79–83.

23. Коваль А. О. Використання методу внутрішнього контролю для досліджень перехідних характеристик давачів тиску. *Український метрологічний журнал*. Харків. 2015. №1. С. 64–67.

24. Коваль А. О. Вдосконалення методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску: дис. канд. техн. наук.: 05.01.02. Харків. 2016. 224 с.

25. Коваль А. О., Коваль О. А. Просторова розподілені інтелектуальні вимірювальні інформаційні системи: монографія. Харків: Лідер, 2017. 144 с.

26. Коваль О. А., Коваль А. О., Богатов О. І., Петрукович Д. С. Нейромережеві методи в інтелектуальних вимірювальних інформаційних системах: монографія. Харків: Лідер, 2020. 148 с.

27. Захаров И. П., Сергиевко М. П. Метрологическая идентификация динамических характеристик средств измерительной техники. Харьков: Компания СМІТ, 2012, 232 с.

## References

1. Sposib formuvannya testovogo signalu dlya kontrolyu dynamichnih harakteristik vimiryuvalnih kanaliv [A method of generating a test signal to control the dynamic characteristics of measuring channels]: pat. 86669 Ukrayina: МРК: G05B 23/00, G05B 23/02; zayavl. 12.06.2007; opubl. 12.05.2009, Byul. №9. 3 p.

2. Kondrashov S. I. Metodi pidvishennya tochnosti sistem testovih viprobuvuvan elektrichnih vimiryuvalnih peretvoryuvachiv u robochih rezhimah [Methods for improving the accuracy of test systems for electrical measuring transducers in operating modes]: monografiya. Harkiv : NTU "HPI", 2004. 224 p.

3. Aleksandrov A. G. Adaptivnoe upravlenie s etalonnogo modelu pri vneshnih vozmusheniyah [Adaptive control with a reference model under external disturbances]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2004. №5. P. 77–91.

4. Egorshin A. O. Optimizatsiya parametrov stacionarnykh modelej v unitarnom prostranstve [Optimization of parameters of stationary models in unitary space]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2004. №2. P. 29–49.

5. Kostoglotov A. A. Sintez intellektualnykh izmeritelnykh procedur na osnove principov regulyazatsii [Synthesis of intelligent measurement procedures based on regularization principles]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2001. №1. P. 8–12.

6. Kruzner A. B. Vosstanovlenie vhodnykh signalov sredstv izmerenij, opisyyvaemykh linejnymi differentsialnymi uravneniyami s postoyannymi koeffitsientami [Reconstruction of input signals of measuring instruments described by linear differential equations with constant coefficients]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 1996. №42. P. 142–152.

7. Kuş J., J. Korbicz Artificial neural networks in fault diagnosis of dynamical. *Diagnostics of Processes*. 2013. P. 37–49.

8. Materassi D. Reconstruction of topologies for acyclic networks of dynamical systems. *Proc. of the American Control Conference*. 2014. P. 37–41.

9. Tan P. V., Millérioux G., Daafouz J. A contribution to the identification of switched dynamical systems over finite fields. *Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control*. 2013. P. 4429–4434.

10. Saggin B., Debei S., Zaccariotto M. Dynamic error correction of a thermometer for atmospheric measurements. *Measurement*. 2015. № 30. P. 223–230.

11. Cessac B. Neural Networks as dynamical systems. *International Journal of Bifurcations and Chaos*. 2014. №6. P. 1585–1629.

12. Ishuk I. P. Mnogofaktornye izmereniya pri identifikatsii peremennykh na liniyah neopredelennosti [Multifactor measurement, identification of variables on the lines of uncertainty]. *Metrologiya*. Moskva. 2003. №12. P. 3–7.

13. Kalach A. V. Primenenie metrologii iskusstvennykh nejronnykh setej dlya obrabotki signalov sensorov [The application of Metrology of artificial neural networks for processing of sensor signals]. *Nejrokompyutery*. Moskva. 2003. №10. P. 43–47.

14. Kobayakov P. V., Malyhina G. F. Analiz arhitektury temporalnykh setej i ih primeneniye v informatsionnykh sistemah [Analysis of temporal networks architectures and their application in information systems]. *Datchiki i sistemy: Sbornik dokladov mezhdunarodnoj konferentsii. Tom III*. Moskva. 2002. P. 140–144.

15. Degtyarev A. V., Zaporozhec O. V., Ovcharova T. A. Identifikatsiya nelinejnykh dinamicheskikh sredstv izmerenij s pomoshchyu iskusstvennoj nejronnoj seti [Identification of nonlinear dynamic means of measurements by means of an artificial neural network]. *Metrologiya ta priladi*. Harkiv. 2013. №2. P. 85–89.

16. Nazarov A. V. Loskutov A. I. Nejrosetevye algoritmy prognozirovaniya i optimizatsii sistem [Neural network algorithms for predicting and optimizing systems]. Moskva: Nauka i Tekhnika, 2003. 384 p.

17. Vasilev V. I., Valeev S. S., Shilonosov A. A. K vyboru struktury nejroregulyatora v sisteme upravleniya dynamicheskimi obektom [The choice of the structure of neural regulator in the control system of dynamic object]. *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye*. Moskva. 2001. №4. P. 52–60.

18. Wasserman P. D. *Neural Computing: Theory and Practice*. 1989. 230 p.

19. Khrobotov D. A., Filaretov G. F. Sensor Calibration with Artificial Neural Network. *45th International Scientific Colloquium*. 2000. P. 2–7.

20. Vodotyka C. V. Ispolzovanie iskusstvennykh nejronnykh setej pri postroenii kalibrovочноj zavisimosti sredstva izmereniya [The use of artificial neural networks in the construction of the calibration dependence of the measuring instrument]. *Sistemy obrobki informatsiyi*. Harkiv. 2011. №1. P. 24–28.

21. Koval A. O., Polyarus O. V. Vikoristannya metodu shumiv ta online diagnostiki dlya vdoskonalennya metrologichnogo zabezpechennya na tehnogenno nebezpechnih ob'ektah [Using the noise method and online diagnostics to improve the metrological support of the technogenic hazardous objects]. *Visnik NTU "HPI"*. Harkiv. 2015. №35. S. 152–156.

22. Koval A. O. Prognozuvannya metrologichnoyi nadijnosti datchikov tisku na tehnogenno-nebezpechnih ob'ektah [Forecasting of metrological reliability of pressure sensors on technogenic-hazardous objects]. *I Vseukrayinska nauk.-teh. konf. "Aktualni problemi avtomatiki ta priladobuduvannya"* : zb. tez dop. nauk.-prakt. konf., m. Harkiv NNC "Institut metrologiyi". Harkiv. 2014. P. 79–83.

23. Koval A. O. Viktoristannya metodu vnutrishnogo kontrolyu dlya doslidzhen perehidnih harakteristik davachiv tisku [Use of internal control method for research of transitional characteristics of pressure sensors]. *Ukrayinskij metrologichnij zhurnal*. Harkiv. 2015. №1. P. 64–67.

24. Koval A. O. Vdoskonalennya metodiv viznachennya dinamichnih harakteristik vimiryuvalnih kanaliv tisku [Improvement of methods of dynamic characteristics determination for pressure measuring channels]: dis. kand. tehn. nauk : 05.01.02. Harkiv. 2016. 224 p.

25. Koval A. O., Koval O. A. Prostrovo rozpodileni intelektualni vimiryuvalni informacijni sistemi: monografiya [Spatially distributed intelligent measuring information systems]. Harkiv : Lider, 2017. 144 p.

26. Koval O. A., Koval A. O., Bogatov O. I., Petrukovich D. Ye. Nejromerezhevi metodi v intelektualnih vimiryuvalnih informacijnih sistemah: monografiya [Neural network methods in intelligent measuring information systems]. Harkiv: Lider, 2020. 148 p.

27. Zaharov I. P., Sergienko M. P. Metrologicheskaya identifikaciya dinamicheskikh harakteristik sredstv izmeritelnoj tehniki. Harkov: Kompaniya SMIT, 2012, 232 s.