

УДК 621.314

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДАВАЧІВ  
ЗАСОБАМИ ВБУДОВАНОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ**

Д-р техн. наук С.І. Кондрашов, канд. техн. наук А.О. Каграманян,  
канд. техн. наук М.І. Опришкіна

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ  
СРЕДСТВАМИ ВСТРОЕННОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ**

Д-р техн. наук С.И. Кондрашов, канд. техн. наук А.А. Каграманян,  
канд. техн. наук М.И. Опришкина

**THE IMPROVE OF THE MEASUREMENT ACCURACY ELECTRICAL SENSOR  
MEANS OF THE BUILT-IN TEST CONTROL**

**Dr. of tehn. sciences S.I. Kondrashov, cand. of tehn. sciences  
A.A. Kagramanyan, cand. of tehn. sciences M.I. Oprishkina**

*Стаття присвячена вирішенню задачі підвищення точності вимірювання електричних вимірювальних перетворювачів з нелінійними дробово-раціональними функціями перетворення засобами вбудованого тестового контролю. Розроблено інженерний метод визначення параметрів систем тестового контролю, який дозволяє за заданою точністю вимірювань отримати кількість необхідних розрядів АЦП.*

***Ключові слова:** електричні вимірювальні перетворювачі, методи підвищення точності, тестовий контроль, дробово-раціональна функція перетворення, метрологічні характеристики, похибка нелінійності.*

*Статья посвящена решению задачи повышения точности измерения электрических измерительных преобразователей с нелинейными дробно-рациональными функциями преобразования средствами встроенного тестового контроля. Разработан инженерный метод определения параметров систем тестового контроля, который позволяет при заданной точности измерений получить количество необходимых разрядов АЦП.*

***Ключевые слова:** электрические измерительные преобразователи, методы повышения точности, тестовый контроль, дробно-рациональная функция преобразования, метрологические характеристики, погрешность нелинейности.*

*The work was further developed the theory of test methods to improve the accuracy concerning electric measuring converters that have a non-linear polynomial and rational functions of transformation. The linearizing and stabilizing properties of the relational-difference operators correcting input was analised. It is proved that the operators can obtain an estimate of the*

*correction input signal of the formation test additive effects of two types of the same size and opposite signs or identical sign, but different magnitude. Designed engineering method of determining the parameters of test control systems, which allows us to solve the problem of synthesis and analysis of test control systems: by the specified accuracy of measurements to obtain the necessary number of ADC bits, or to solve the inverse is more often encountered in practice, the problem and calculate the accuracy of the system for a given bit ADC.*

**Keywords:** *electric measuring transducers, methods to improve the accuracy, test control, fraction of a rational function transformation, electrical measuring converters, metrological characteristics, relational-differential operators correction model, the error nonlinearity.*

**Вступ.** У процесі довготривалої експлуатації на технологічних об'єктах на точнісні характеристики електричних вимірювальних перетворювачів (ЕВП) впливають як зовнішні, так і внутрішні дестабілізуючі фактори. До таких об'єктів можна віднести прилади контролю викидів забруднюючих речовин від транспортних засобів. Виникає проблема втрати інформації, зниження рівня її достовірності внаслідок поступової зміни метрологічних характеристик та виникнення похибок.

Традиційні методи метрологічного забезпечення ЕВП у складі вимірювальних каналів мають обмежене застосування у разі безперервного технологічного процесу, оскільки неможливо зупинити обладнання для демонтажу ЕВП та проведення поточного контролю. З точки зору корекції систематичних похибок вхідних сигналів ЕВП перспективним напрямком є застосування тестових методів, оскільки вони не потребують відключення вхідного сигналу від засобу вимірювання.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** На сьогоднішній день, незважаючи на достатньо великий об'єм досліджень у галузі систем тестового контролю, залишається ряд невирішених задач, які суттєво обмежують використання тестових методів для вимірювальних каналів, що мають у своєму складі ЕВП з нелінійними, у тому числі дробово-раціональними функціями перетворення (ДРФП). Отже, подальший розвиток теоретичних основ тестових методів ЕВП, їх удосконалення та детальний аналіз похибок, є актуальною задачею, що дозволить у значній мірі заощадити матеріальні та технічні ресурси шляхом

подовження терміну служби ЕВП на об'єкті експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для діагностики характеристик точності необхідно одержати інформацію про поточні значення вимірювальних перетворювачів. Для цього розробляються спеціальні алгоритми побудови давачів і модульних блоків без переривання впливів технологічного середовища на давач. У результаті обробки тестових сигналів одержують поточні значення похибок, за допомогою яких прогнозується ймовірність виходу каналу з класу точності, і комп'ютерна система приймає рішення про введення поправок у результати вимірювання параметрів технологічних процесів або автоматичне підстроювання характеристик давачів і перетворювальних блоків до відновлення їхніх характеристик точності.

У роботі Е.М. Бромберга та К.Л. Куліковського [1] було обґрунтовано можливість застосування таких методів для вимірювальних перетворювачів з поліноміальною та дробово-раціональною функціями перетворення. Подальший розвиток ці методи знайшли у роботі Ю.М. Туза [2], Ю.О. Скрипника [3-5], С.І. Кондрашова [6-13], Н.І. Лиманової [14].

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою статті є дослідження можливості використання тестів: адитивних, мультиплікативних або комбінованих у електричних перетворювачах, що мають ДРФП; проведення аналізу метрологічних властивостей реляційно-різницевих моделей (РРМ); визначення вимог до точності вимірювання вхідних електричних сигналів ЕВП при формуванні РРМ з урахуванням похибки нелінійності операторів корекції та розробка методу аналізу і синтезу систем

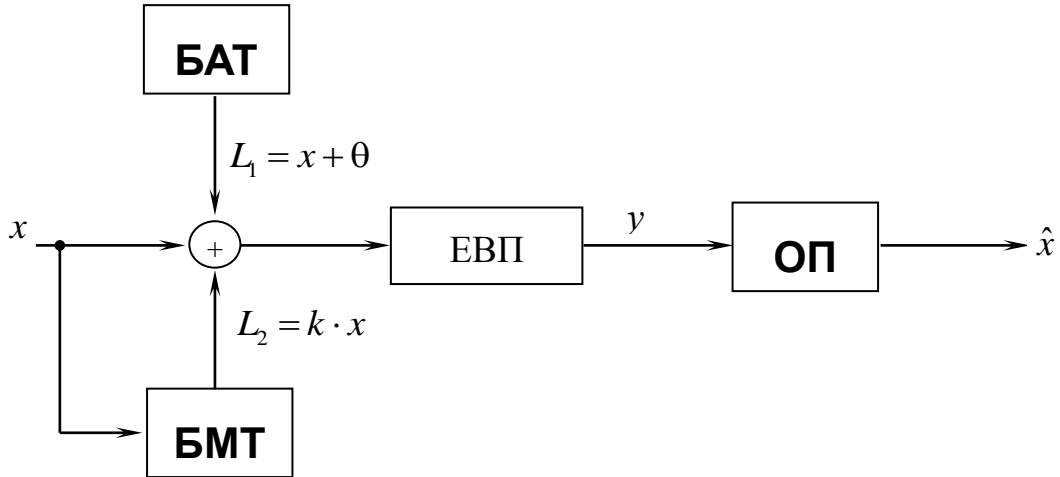
тестового контролю ЕВП з ДРФП.

**Основна частина досліджень.**

Тестові методи підвищення точності результатів вимірювальних перетворювань дозволяють забезпечити їх інваріантність до

впливу сильнокорельованих складових похибок [10].

Структурна схема системи тестового контролю наведена на рис. 1.



БАТ, БМТ – Блоки формування адитивних та мультиплікативних тестових впливів, відповідно;

ЕВП – електричний вимірювальний перетворювач з нелінійною ДРФП;

ОП – обчислювальний пристрій.

Рисунок 1 – Блок-схема системи тестового контролю

Блоки формування тестових сигналів формують впливи  $L_1(x) = x + \theta$  та  $L_2(x) = k \cdot x$ , які подаються на ЕВП у додаткових тактах вимірювання.

На основному такті ці блоки відключені і вимірювана величина  $x$  поступає безпосередньо на ЕВП. Вихідний сигнал  $y$  подається на обчислювальний пристрій, у якому програмно реалізований

алгоритм тестового контролю і на виході ОП отримують оцінку значення вхідного сигналу  $\hat{x}$ . Блок-схема алгоритму тестового контролю наведена на рис. 2.

**Тестовий контроль ЕВП з ДРФП.**

Існує численний клас ЕВП [13], функція перетворення яких може бути задана у вигляді математичної моделі

$$y_0 = a_0 + a_1 x^{-1} + a_2 x^{-2} + \dots + a_n x^{-n} = \sum_{i=0}^n a_i x^{-i}, \quad a_i \neq 0.$$

Вважаючи на це, результати додаткових вимірювань  $y_1, y_2, \dots, y_n$  при відповідних тестових впливах

$L_i(x), i = \overline{1, n}$ , можуть бути записані у вигляді:

$$\begin{cases} y_1 = a_0 + a_1 [L_1(x)]^{-1} + \dots + a_n [L_1(x)]^{-n}; \\ y_2 = a_0 + a_1 [L_2(x)]^{-1} + \dots + a_n [L_2(x)]^{-n}; \\ \dots \\ y_n = a_0 + a_1 [L_n(x)]^{-1} + \dots + a_n [L_n(x)]^{-n}. \end{cases} \quad (1)$$

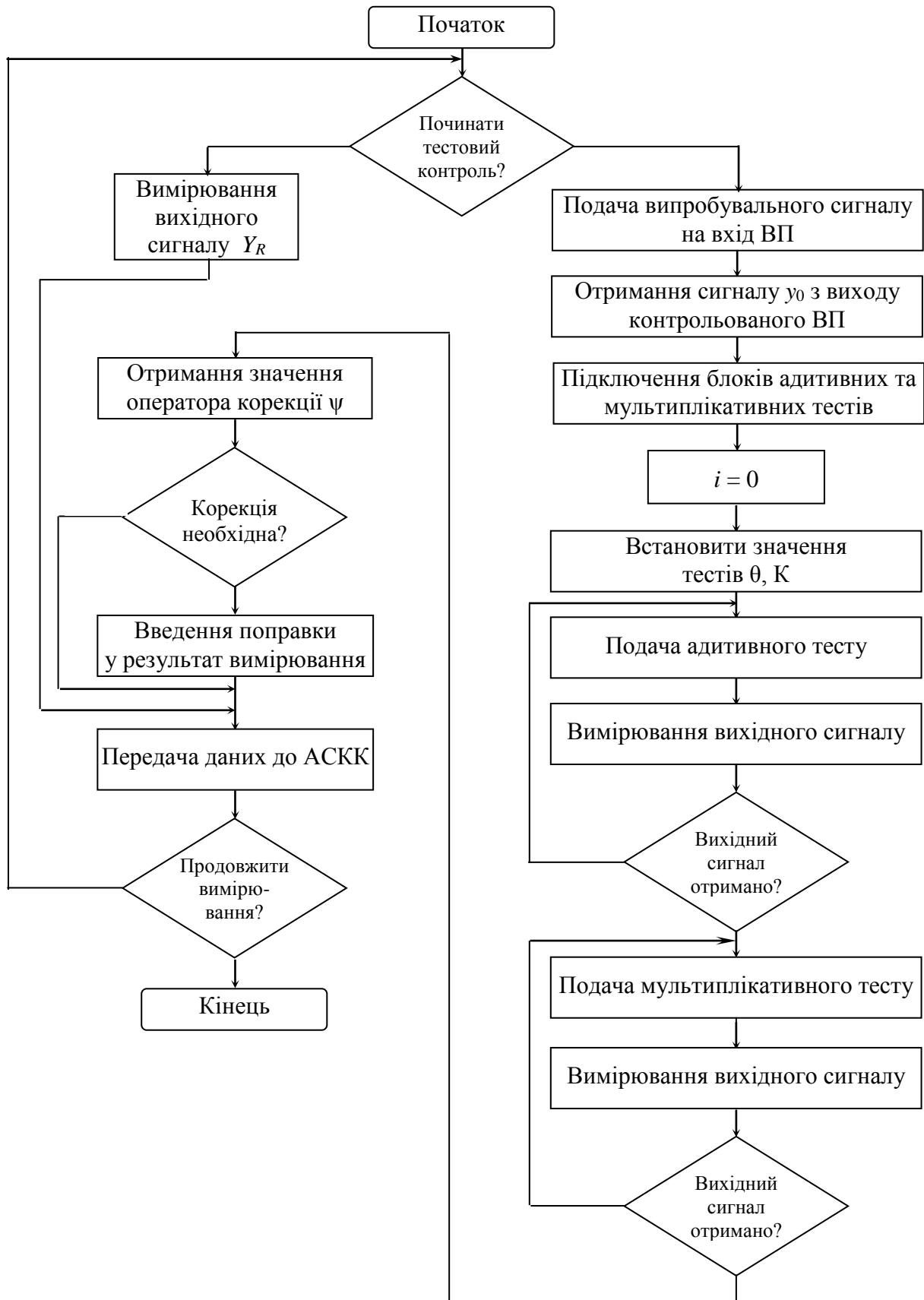


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму тестового контролю вхідного сигналу ЕВП  
 При лінійному наближенні математичної моделі ДРФП вираз (1) матиме вигляд

$$\begin{cases} y_1 = a_0 + a_1 [L_1(x)]^{-1}, \\ y_2 = a_0 + a_1 [L_2(x)]^{-1}. \end{cases}$$

Аналізуючи можливість використання тестів трьох видів (адитивних  $L(x) = x \pm \theta$ ; мультиплікативних  $L(x) = k \cdot x$  та комбінованих  $L_1(x) = x + \theta$ ,  $L_2(x) = k \cdot x$ ), доведено, що значення оцінки вхідного сигналу ЕВП можна знайти при використанні адитивних тестів однакової величини, але різних за знаками ( $L_{1,2}(x) = x \pm \theta$ ), або однакових за знаками, але різних за величиною ( $L_{1,2}(x) = x + \theta_{1,2}$ ) з формули

$$\hat{x} = \theta \frac{\Delta y_{20} + \Delta y_{01}}{\Delta y_{20} - \Delta y_{01}} = \theta \frac{\psi - 1}{\psi + 1} = \theta \cdot \psi^*, \quad (2)$$

де  $\psi = \Delta y_{20} / \Delta y_{10}$  – тестовий реляційно-різницевий оператор корекції, що визначається експериментально;

$\Delta y_{20}$ ,  $\Delta y_{10}$  – різниці значень вихідних сигналів ЕВП;

$\psi^*$  – узагальнений математичний оператор корекції для ДРФП.

Використання змішаних або мультиплікативних тестів не призводять до появи РРМ та не дозволяють виключити адитивну складову похибки вимірювання [9, 11].

Це має велике практичне значення для приладів, у яких неможливо сформувані мультиплікативні тести.

**Розробка методу визначення параметрів систем тестового контролю.** Для вирішення цієї задачі проведено оцінку похибки непрямих вимірювань при нелінійних залежностях [11].

Оскільки функція оператора корекції (2) є нелінійною, для оцінки її похибки запропоновано використати метод лінеаризації, що передбачає розкладання в ряд Тейлора. На практиці залишковим членом ряду  $R$  нехтують, як правило, без перевірки умови

$$R \leq 0.8 \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial \Delta y_{ij}^2} \left( \overset{\circ}{\Delta}(\Delta y_{ij}) \right)^2}.$$

Але у системах тестового контролю ця перевірка стає необхідною тому, що значення вимірюваного вихідного електричного сигналу є на порядок більшим, ніж значення різниць  $\Delta_{ij}$ . Також, при використанні різницевих величин підсилюється вплив випадкової похибки. У найгіршому випадку ця складова похибки подвоюється. Випадкові похибки вимірювання різниць сигналів дорівнюють шагу квантування  $\overset{\circ}{\Delta}(\Delta y_{01}) = \overset{\circ}{\Delta}(\Delta y_{20}) = q$  засобу вимірювання, отже

$$\frac{q(\beta + 1)(1 + \psi)}{\Delta y_{01}(\psi - \beta)} \leq 0.8 \frac{1}{\sqrt{6k}} \sqrt{1 + \psi^2}, \quad (3)$$

де  $k$  – кількість додаткових вимірювань для забезпечення заданої точності контролю.

Враховуючи, що шаг квантування ЗВ дорівнює  $q = Y_{\max} / (2^n - 1) \cong Y_{\max} / 2^n$ , (3) матиме вигляд:

$$\frac{1}{2^n} D_y D_{\Delta y} \frac{(\beta + 1)(1 + \psi)}{(\psi - \beta)} \leq 0.8 \frac{1}{\sqrt{6k}} \sqrt{1 + \psi^2}$$

де  $D_y = Y_{\max} / Y$  – динамічний діапазон значення вхідного сигналу ЕВП;

$D_{\Delta y} = Y / \Delta y_{01}$  – динамічний діапазон значення тестового впливу.

У роботі було отримано розрахункову формулу для знаходження числа розрядів  $n$  АЦП ЗВ, яке забезпечує необхідну точність системи тестового контролю

$$n = \log_2 \frac{1.6 D_y D_{\Delta y} (\beta + 1) \sqrt{1 + \psi^2}}{\delta x_p \sqrt{6k} (\psi - \beta) (\psi + 1)},$$

та константу для заданої різницевої моделі оператора корекції

$$C = \delta x_p \cdot k = 0.213 \cdot (1 + \psi^2) / (1 + \psi)^2$$

Константа  $C$  дозволяє при заданій похибці вимірювання  $\delta x_p$  визначити кількість додаткових вимірювань  $k$ , необхідних для забезпечення точності контролю  $\delta x_p$ . Для того, щоб підвищити точність системи тестового контролю, слід мінімізувати константу моделі  $C$ . Аналізуючи отримані дані, зроблено висновок, що значення  $C$  залежить від відношення тестів  $\gamma = \theta_1 / \theta_2$ , або  $\beta = \theta_2 / \theta_1$ .

На основі проведених розрахунків було побудовано графічні залежності (рис. 3), та запропоновано метод визначення параметрів систем тестового контролю.

Для визначення параметрів систем тестового контролю запропоновано здійснити наступні операції:

- визначити модель оператора корекції;
- задати необхідну точність за шкалою  $-\lg \delta x_p$  (наприклад, 3);
- зі знайденої точки провести перпендикуляр до кривої, що відповідає константі моделі  $C$ ;
- визначити відповідну кількість додаткових вимірювань  $k$  на шкалі  $\lg k$ , яка забезпечить задану точність вимірювання;
- перейти по лініях кількості вимірювань до кривої, що визначає розрядність АЦП;
- визначити число розрядів  $n$ , що забезпечить задану точність вимірювання.

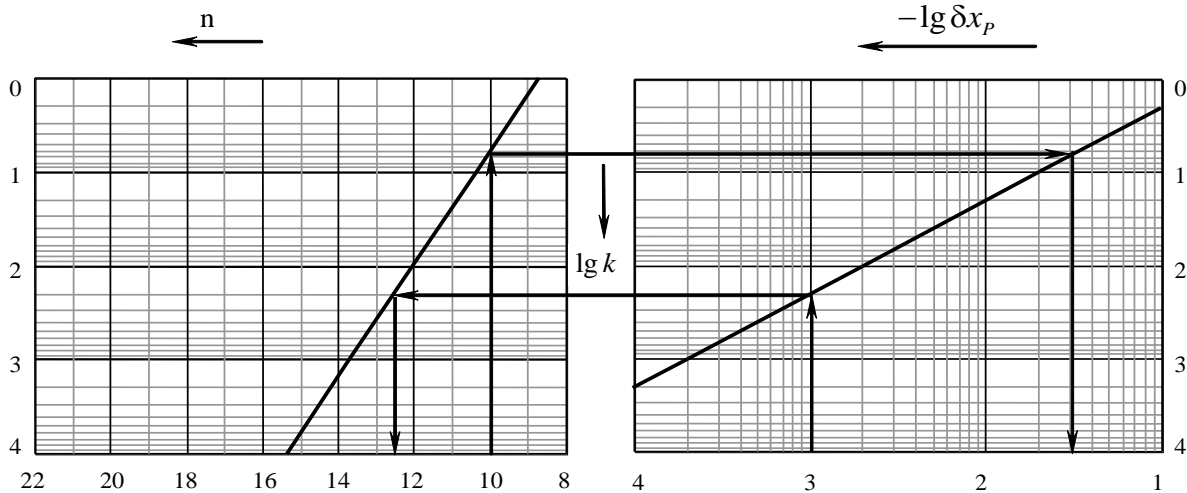


Рисунок 3 – Функціональні залежності для розрахунку параметрів системи тестового контролю

Так, наприклад, при заданій похибці вимірювання  $\delta x_p = 0.001$  ( $-\lg \delta x_p = 3$ ) кількість розрядів АЦП становить  $n = 12.55 \approx 12-13$ .

На практиці виникає зворотна задача аналізу точності системи тестового контролю. При заданих параметрах розрядності АЦП потрібно визначити кількість додаткових вимірювань  $k$  та точність системи контролю.

Схема послідовності дій показана на рис. 3 стрілками в напрямку, зворотному до прямої задачі.

**Висновки з дослідження.** У статті представлено рішення науково-практичної задачі підвищення точності ЕВП шляхом тестових випробувань при бездемонтажному контролі у робочих режимах на основі використання теорії реляційно-різницевих операторів корекції. Вони дозволяють здійснювати тестовий контроль ЕВП одночасно з дією вхідного сигналу.

Доведено, що тестові методи підвищення точності для ЕВП з ДРФП дозволяють корегувати результати вимірювання вхідного сигналу лише за умови формування адитивних тестових

впливів однакової величини, але різних за знаками або однакових за знаками, але різної величини. Мультиплікативні та змішані адитивні і мультиплікативні тести не дозволяють визначити оцінку дійсного значення вхідного сигналу ЕВП.

Вирішено задачу синтезу системи контролю ЕВП з ДРФП за критерієм заданої точності. Розроблено інженерний метод визначення параметрів систем тестового

контролю, що дозволяє за заданою точністю вимірювань отримати кількість необхідних розрядів АЦП, або вирішити зворотну задачу і розрахувати точність системи за заданою розрядністю АЦП.

Результати роботи можуть бути застосовані при контролі точності приладів вимірювання рівня забруднюючих викидів від транспортних засобів [15].

### *Список використаних джерел*

1. Бромберг Э. М., Куликовский К. Л. Тестовые методы повышения точности измерений / Э. М. Бромберг, К. Л. Куликовский. – М. : Энергия, 1978. – 176 с.
2. Туз Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. – Киев : Вища школа, 1976 – 256 с.
3. Скрипник Ю. А. Повышение точности измерительных устройств / Ю. А. Скрипник – К. : Техніка, 1976. – 264 с.
4. Скрипник Ю. А., Кондрашов С. И. Реляционные модели измерительных каналов с нелинейными датчиками // Український метрологічний журнал. – 1996. – Вип. 2-3. – С. 71-74.
5. Кондрашов С. І., Скрипник Ю. О., Опришкіна М. І. Лінеаризація оператора корекції похибок вимірювального перетворювача методом гіпербол. VI МНТК «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2008). Праці конференції у 2-х томах. – Харків : ННЦ «Інститут метрології» – 2008. Т. 2. – С. 297-300.
6. Кондрашов С. І., Опришкіна М. І. Реляційно-різницеві моделі операторів корекції вимірювальних перетворювачів з дробово-раціональними функціями перетворення. Вестник НТУ «ХПИ». Сб. науч. трудов. Тематическое издание : Автоматика и приборостроение. – Харьков. : НТУ «ХПИ». –2005. – Вып. 7. – С. 77-80.
7. Кондрашов С. И., Опрышкина М. И. Тестовые методы исключения систематических погрешностей из результатов измерений. Сборник научных трудов по материалам 2-го международного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития МРФ-2005» Т. VII МК МИТ. – Харьков : АНПРЭ, ХНУРЕ. – 2005. – С. 87-90.
8. Кондрашов С. И., Опрышкина М. И. Реперные реляционно-разностные модели в задачах коррекции систематических погрешностей. Сборник научных трудов по материалам 2-го международного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития МРФ-2005» Т. VII МК МИТ. – Харьков : АНПРЭ, ХНУРЕ. – 2005. – С. 102-105.
9. Кондрашов С. І., Опришкіна М. І. Тестовий метод підвищення точності електричних вимірювальних перетворювачів з нелінійними дробово-раціональними функціями перетворення. «Український метрологічний журнал». – Харків : ННЦ «Інститут метрології». – 2009. № 2. С. 51-56.
10. Кондрашов С. І. Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах тестових впливів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05. 11. 05 «Прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин» / С. І. Кондрашов. –Харків, 2004. – 38 с. [НТУ «ХПИ»].
11. Кондрашов С. І., Опришкіна М. І. Функціональний аналіз РРМ оператора корекції похибок ЕВП з нелінійною дробово-раціональною функцією перетворення. Наук. праці V МНТК «Метрологія та вимірювальна техніка» (Метрологія-2006) у 2-х томах. Т. 2. – Харків : ННУ «Інститут метрології», 2006. – С. 368-371.

12. Кондрашов С. І., Скрипник Ю. О., Опришкіна М. І. Лінеаризація оператора корекції похибок вимірювального перетворювача методом гіпербол. VI МНТК «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2008). Праці конференції у 2-х томах. – Харків : ННЦ «Інститут метрології» – 2008. Т. 2. – С. 297-300.

13. Кондрашов С. І., Опришкіна М. І. Оцінка похибки нелінійності при тестовому контролі. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Зб. наук. праць. Темат. вип. «Електроенергетика и преобразовательная техника». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 11. – С. 72-75.

14. Лиманова Н. И. Датчики механических величин, инвариантные к дестабилизирующим факторам : автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук : спец. 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» / Н. И. Лиманова. – Самара, 2006. – 38 с. [«Самарский государственный аэрокосмический университет» им. С. П. Королёва].

15. ВНД 32.0.06.001-99 Пункты екологічного контролю викідів забруднюючих речовин від тепловозних дизелів. Загальні технічні вимоги. Наказ Міністерства транспорту України від 22.07.99 р. за № 381. Зареєстровано в Укрзалізстандарт 29.09.1999 за №32/023, 28с.

Рецензент проф. НТУ «ХПІ» О.П. Давиденко

---

*Кондрашов Сергій Іванович, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тел.: 70-76-180.*

*Каграманян Артур Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри теплотехніки та теплових двигунів, проректор Української державної академії залізничного транспорту.*

*Опришкіна Марина Ігорівна, канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тел.: 70-76-015, (093)892-68-93. E-mail: [flaming541@yandex.ua](mailto:flaming541@yandex.ua).*

*Kondrashov Sergey I., Dr. of tehn. sciences, prof., Head of Department of Information and measuring technologies and systems of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel. : 70-76-180.*

*Ghahramanyan Arthur A., PhD. tehn., Associate Professor, Department of Thermal Engineering and Heat Engines, vice-rector of the Ukrainian State Academy of Railway Transport.*

*Oprishkina Marina I., PhD. tehn., Associate Professor, Department of Information and measuring technologies and systems of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: 70-76-015. (093)892-68-93. E-mail: [flaming541@yandex.ua](mailto:flaming541@yandex.ua).*