

- the productivity and accuracy of control of complex surfaces on coordinate measuring machines]. *Sistemy proektirovanija, tehnologicheskij podgotovki proizvodstva i upravlenija jetapami zhiznennogo cikla promyshlennogo produkta – Systems of design, technological preparation of production and management of the stages of the life cycle of an industrial product*. Moskva: IPU RAN, S. 223-225 [in Russian].
11. Graham, T. (2016). *Smith Machine Tool Metrology*. Smith An Industrial Handbook Springer International Publishing Switzerland [in English].
 12. Jetingof, M.I. (2016). *Avtomaticeskij razmernyj kontrol' na metallovezhushhih stankah [Automatic dimensional control on metal-cutting machines]*. Moscow: APR [in Russian].

Volodymyr Kvasnikov, Prof., DSc., **Denis Kataiev**, post-graduate
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Methods of Increasing the Accuracy of Measuring with the Help of a Coordinate-Measuring Hand

In industrial practice, the specification of requirements for the accuracy of manufacturing a part with a complex spatial shape is still not accurate enough, which often leads to significant deviations from the given shape. Since the nominal shape of a part with a complex geometry is determined by characteristic points, the task of standardizing the tolerances to the positions of these points and improving the measurement accuracy control process becomes urgent.

The article has developed algorithms for the control of measuring measuring measures of the measuring and measuring hand for remote measurements. Algorithms for assessing the accuracy of remote measurements of parts with complex geometric shape are proposed.

The principle of operation of V-shaped probes is described. A critical analysis of the specification of requirements for accuracy for measuring parts with complex geometric shapes was carried out. The main sources of measurement errors are investigated by means of a coordinate-measuring hand.

Based on the results of the study, the most important sources of measurement error were identified.

coordinate measuring equipment, coordinate-measuring hand, geometric tolerances, contactless probe, remote measurements

Одержано (Received) 07.09.2022

Прорецензовано (Reviewed) 16.09.2022

Прийнято до друку (Approved) 26.09.2022

УДК 621.317

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.60-69](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.60-69)

Д.М. Квашук, доц., канд. екон. наук, **В.М. Єгунько**
Національний авіаційний університет, Київ, Україна
e-mail: dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua, sv@nau.edu.ua

Аналіз методів корекції похибок вимірювальних приладів

В роботі проводиться аналіз шляхів забезпечення точності вимірювальних приладів з використанням методів корекції похибок. Проведено аналіз різних методів корекції похибок, що викликані статичними та динамічними факторами. Досліджено зворотні математичні моделі вимірювальних каналів, в якості яких використовуються інтерполяційні поліноми Лагранжа. Розглядаються способи застосування таких моделей у методах зразкових сигналів та у тестових методах підвищення точності. Запропоновано вдосконалення тестового методу коригування похибки. Обґрунтовано ефективність даного вдосконалення для застосування у складі інформаційно-вимірювальної системи. Показано, що найважливішими напрямками підвищення ефективності такої системи є забезпечення необхідної експериментальної бази, а також точність налаштування алгоритмів корекції.

похибка, вимірювання, корекція похибки, регулювання, перетворювач, зворотній зв'язок

© Д.М.Квашук, В.М. Єгунько, 2022

Постановка проблеми. Збільшення точності вимірювальних приладів обумовлено потребою в оптимізації енергетичних ресурсів України, оскільки саме вимірювальні прилади відіграють ключову роль в оптимізації роботи електричних машин на промислових підприємствах окремих галузей. Крім того, якість оброблюваної продукції, також залежить від точності автоматизованих систем управління, підтримання яких вимагає корегування точності. Усе це, потребує покращення систем корегування похибок, як на рівні апаратної частини приладу, так і методологічної. Вже існуючі методи значно покращують роботу з управління енергетичними системами, але разом з тим існує необхідність в збільшенні їх точності та швидкодії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед багатьох факторів впливу на точність вимірювальних перетворювачів, можна виділити наступні: вібрація, нестабільність напруги, температура. Дослідження питань коригування похибок в роботі [1] дозволило розробити алгоритм керування робочими органами верстата, які компенсують його температурну похибку з використанням зворотного зв'язку та спеціального алгоритму внесення відповідних поправок. В даному випадку корекція полягає в тому, що на вхід вимірювального перетворювача подається тестовий сигнал певної інтенсивності. За реакцією вимірювального перетворювача на цей сигнал визначають значення його похибки. Потім приймається рішення про введення поправки шляхом регулювання одного з параметрів інформаційного перетворювача.

На практиці найчастіше зустрічаються завдання пов'язані з корекцією адитивної та мультиплікативної складових похибок вимірювальних перетворювачів, які складають абсолютну похибку $\Delta(x)$, поточне значення якої можна описати наступним виразом:

$$\Delta(X) = \Delta_0 + \gamma_0 x, \quad (1)$$

де Δ_0 – адитивна похибка;

$\gamma_0 x$ – мультиплікативна похибка.

При адитивній корекції похибки вимірювальних засобів, зменшення похибки здійснюється за допомогою зміщення функції перетворення (рис. 1).



Рисунок 1 – Структурна схема засобу вимірювання з адитивною корекцією похибки
Джерело: розроблено автором на основі джерела [2]

На рис. 1 відображено одну з найбільш розповсюджених структурних схем засобів вимірювання з адитивною корекцією. У цій схемі операція виділення сигналу похибки ΔX відбувається в результаті одночасного, або різночасового віднімання двох сигналів – вхідного X та зворотного U_k . Він підсилений допоміжним каналом, який видає різницевий сигнал U_2 , що використовується для введення поправок у засіб вимірювання.

Засоби вимірювання з мультиплікативною корекцією похибок здійснюється за рахунок виділення похибок вимірювання та управління коефіцієнтом перетворення з метою мінімізації похибки (рис. 2).



Рисунок 2 – Структурна схема засобу вимірювання з мультиплікативною корекцією похибки
Джерело: розроблено автором на основі джерела [3]

Характеристика перетворення такого способу має вигляд:

$$Y = (K + K_s S)X + D_X, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт перетворення засобу вимірювання;

$K_s S$ – зміна коефіцієнта перетворення засобів вимірювання під дією сигналу S

У такий спосіб можна коригувати адитивні та мультиплікативні похибки, проте при переважанні адитивної похибки корекція здійснюється лише в одній точці шкали засобу вимірювання.

Корекція похибки може бути здійснена з використанням корекції сигналу. Для практичної реалізації даного способу необхідно мати надмірність швидкодії та набір зразкових сигналів (рис. 3).

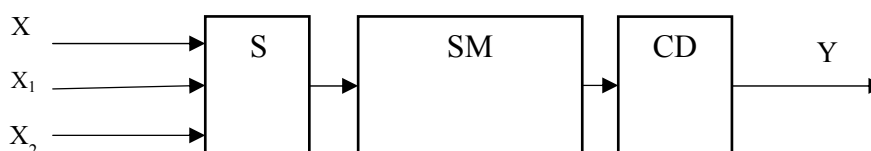


Рисунок 3 – Корекція похибки з використанням способу зразкових сигналів
Джерело: розроблено автором на основі джерела [4]

На рис. 3 представлено блок зразкових значень S , куди передаються по черзі вхідні сигнали $x_1 \dots x_n$, після порівняння вони передаються до системи вимірювання, обробка яких може бути описана системою лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} y_0 = a_1 + a_2 x \\ y_1 = a_1 + a_2 x_1, \\ y_2 = a_1 + a_2 x_2 \end{cases} \quad (3)$$

де a_1, a_2 – коефіцієнти характеристики перетворення системи вимірювання.

Вирішив відповідну систему рівнянь отримаємо:

$$x = x_2 (y_0 - y_1) / (y_2 - y_1) - x_1 (y_2 - y_0) / (y_2 - y_1), \quad (4)$$

В даному випадку значення x залежить від зміни параметрів характеристик перетворення. Таким чином, знижується як адитивна, так і мультиплікативна складові похибки. Високу ефективність такого методу можна спостерігати, коли значення x та

коефіцієнти a_1 і a_2 не змінюються за час, який необхідний для отримання одного результату вимірювання.

В роботі [5] досліджувалась ефективність алгоритмів адитивної та мультиплікативної корекції похибок, спрямованих на усунення впливу інструментальної похибки, що дозволило встановити діапазони змін для кожного способу. В результаті оцінки способів усунення впливу інструментальної похибки, авторами було введено відповідні поправочні коефіцієнти η^a та η^m , що являють собою відносні значення ймовірностей помилкових рішень: $P_{ном}^* = P_{ном} + \Delta P_{ном}$, до корекції та після її проведення:

$$\eta^a = \frac{P_{ном} + \Delta P_{ном}}{P_{ном} + \Delta P_{ном}^a} = \frac{1 + \mu}{1 + \frac{\mu}{\tau^a}} = 1 + \frac{\mu(\tau^a - 1)}{\mu + \tau^a}, \quad (5)$$

$$\eta^m = \frac{P_{ном} + \Delta P_{ном}}{P_{ном} + \Delta P_{ном}^m} = \frac{1 + \mu}{1 + \frac{\mu}{\tau^m}} = 1 + \frac{\mu(\tau^m - 1)}{\mu + \tau^m}, \quad (6)$$

$$\text{де } \mu = \frac{\Delta P_{ном}}{\Delta P}, \tau^a = \frac{\Delta P_{ном}}{\Delta P_{ном}^a}, \tau^m = \frac{\Delta P_{ном}}{\Delta P_{ном}^m};$$

η^a – поправочний коефіцієнт адитивної похибки;

η^m – поправочний коефіцієнт мультиплікативної похибки;

$P_{ном}$ – ймовірність помилкових значень.

Таким чином, для покращення потреб коригування похибки необхідні ефективні алгоритмічні методи підвищення точності вимірів. До таких можна віднести методи зразкових сигналів та тестові методи, в основі яких лежить функціональне перетворення засобів вимірювання під час виконання циклу спеціально організованих вимірів. Відповідно, структуру вимірювального каналу, або системи можна представити у вигляді функціональної моделі:

$$Y = F(X, a_0, a_1, a_2, \dots, a_n), \quad (7)$$

де X – вхідна величина;

Y – вихідна величина;

a_0, a_1, \dots, a_n – параметри математичної моделі, яку найчастіше представляють у вигляді функції перетворення степного поліному:

$$Y = \sum_{j=0}^n a_j X^j, \quad (8)$$

де n – порядок поліному.

При цьому кількість зразкових величин, що використовуються для ідентифікації, або тестів не менше $(n+1)$.

Розглядаючи характеристики швидкодії вимірювальних засобів, не можливо оминати зворотні математичні моделі, які використовуються для формування каналів зворотного зв'язку. До таких можна віднести інтерполяційну модель Лагранжа [6]:

$$X = \sum_{j=0}^n L_j(Y_x) \cdot F_j(X), \quad (9)$$

де X – значення вимірюваної величини;

Y_x – значення вихідної величини вимірювального каналу, що відповідає значенню X на його вході;

j – номер вузла інтерполяції;

n – порядок інтерполяційного полінома;

$F_j(X)$ – значення вхідної величини вимірювального каналу в j -му вузлі інтерполяції.

$$L_j(Y_x) = \frac{\prod_{\substack{i=0, j=0 \\ i \neq j}}^n (Y_x - Y_i)}{\prod_{\substack{i=0, j=0 \\ i \neq j}}^n (Y_j - Y_i)}, \quad (10)$$

де $L_j(Y_x)$ – многочлен Лагранжа;

Y_j, Y_i – значення вихідної величини у вузлах інтерполяції;

На практиці найбільше розглядаються лінійні залежності. Так, розглядаючи $F_j(X) = M_j + K_j \cdot X$, як лінійну функцію, де: M_j, K_j – постійні та відомі параметри j -го впливу на вході вимірювального каналу, дозволяє її застосовувати для обробки зразкових сигналів, а також тестових методів підвищення точності. При цьому можливі такі варіанти: $M_j \neq 0, K_j = 0$, в такому випадку на вхід подається зразкова дія, що формується за допомогою міри, значення якої дорівнює M_j ; $M_j \neq 0, K_j = 0$, або $F_j(X) = X + M_j$, в такому випадку на вході формується адитивний тест, в якому зразкова величина дорівнює M_j ; $M_j = 0, K_j \neq 0, K_j \neq 1$, або $F_j(X) = K_j \cdot X$, в такому випадку на вході формується мультиплікативний тест; $M_j \neq 0, K_j \neq 0, K_j \neq 1$, в такому випадку формується комбінований тест, який містить адитивну та мультиплікативну складові.

Використовуючи формулу (9) з урахуванням (10), можна отримати розрахунок зразкових сигналів (рис. 3), а також для тестових методів підвищення точності. При цьому слід враховувати, що загальна кількість вимірювань дорівнює $(n+2)$ і включає одне безпосереднє вимірювання X :

$$X = \frac{\sum_{j=0}^n L_j(Y_x) \cdot M_j}{1 - \sum_{j=0}^n L_j(Y_x) \cdot M_j}, \quad (11)$$

Зважаючи на можливості коригування вихідного сигналу, існує ряд факторів впливу на точність таких коригувальних механізмів, що вимагає додаткових заходів пов'язаних із виключенням впливу на результат вимірювань окремих параметрів вимірювального перетворювача. Тому, існують підходи до вимірювань за допомогою перетворення спеціальних тестових сигналів та обробки результатів перетворень за певним алгоритмом, що дозволяють на своїй базі створювати вимірювальні системи для вимірювань, як електричних, так і неелектричних величин. Сутність тестових методів підвищення точності вимірювань полягає у визначенні параметрів статичної функції перетворення за допомогою додаткових перетворень тестів, які функціонально пов'язані з вимірюваною величиною [6]. При реалізації тестових методів процес вимірювання складається з $n+1$ тактів, де n – кількість використовуваних тестів. У першому такті перетворюється вимірювана величина, далі у n додаткових тактах

перетворюються тести $A_1(x)$, $A_2(x)$, $A_3(x)$, ..., $A_n(x)$, кожен з яких є функцією вимірюваної величини. Результати перетворень y_1, y_2, \dots, y_n можуть бути представлені у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} y_1 = a_1 + a_2 A_1(x) + \dots + a_n A_1(x)^{n-1} \\ y_2 = a_1 + a_2 A_2(x) + \dots + a_n A_2(x)^{n-1} \\ y_n = a_1 + a_2 A_n(x) + \dots + a_n A_n(x)^{n-1} \end{cases}, \quad (12)$$

З метою реалізації тестового алгоритму підвищення точності вимірювань необхідно визначити параметри a_1, a_2, \dots, a_n статичної функції перетворення засобу вимірювання із системи рівнянь (12). Структурна схема вимірювальної системи із використанням тестового методу збільшення точності описана в роботі [6] (рис. 5).

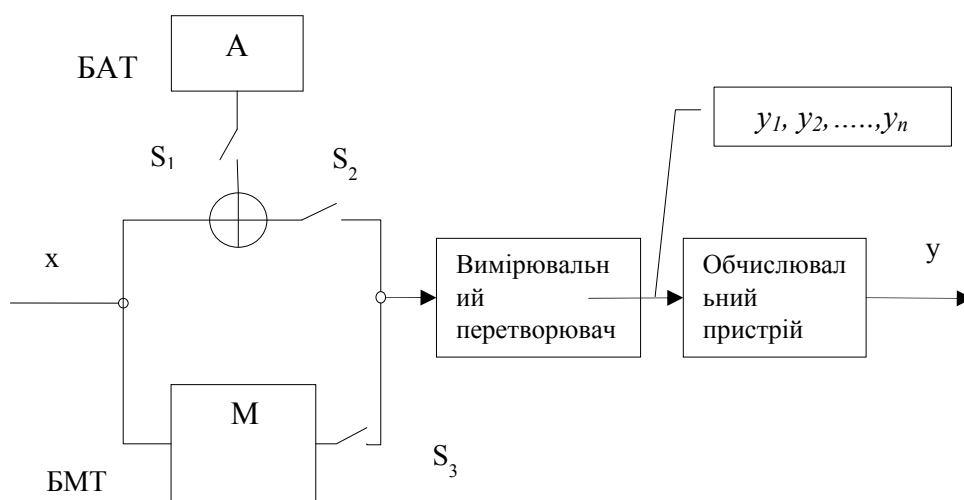


Рисунок 5 – Структурна схема вимірювальної системи алгоритму тестового методу
Джерело: розроблено автором на основі джерел, [1], [4], [6].

На рис. 5 представлено блок адитивного тесту (БАТ), блок мультиплікативного тесту (БМТ), обчислювального пристрою, вимірювального перетворювача та ключів (S_1 - S_3). Вимірювання складається з трьох тактів. У першому такті ключі розімкнуті, при цьому на вхід подається тільки вимірювана величина. У другому такті ключ S_1 замикається і на вхід подається адитивний тест $A+k$, який формується блоком адитивного тесту. Під час третього такту ключ S_1 розмикається, а S_2 замикається, забезпечуючи підключення до входу вимірювального мультиплікативного перетворювача тесту $M \cdot x$, що формується блоком мультиплікативного тесту. Для отримання значення вимірювальної величини слід вирішити систему рівнянь:

$$\begin{cases} y_1 = a_1 + a_2 x \\ y_2 = a_1 + a_2 (x + A), \\ y_3 = a_1 + a_2 Mx \end{cases} \quad (13)$$

Значення вимірювальної величини буде дорівнювати:

$$Y = \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} \cdot \frac{A}{M - 1}. \quad (14)$$

В такому випадку, похибка блоків формування тестів буде представлено, як суму абсолютної похибки Δ_A , що обумовлена відмінністю реального значення

постійної складової адитивного тесту від номінального, абсолютної похибки Δ_M , як відмінності реального значення коефіцієнта перетворення БМТ від номінального, а також вагових коефіцієнтів k_0, k_1 . Вагові коефіцієнти можуть бути визначені наступним співвідношенням:

$$\begin{cases} k_0 = \frac{y_3 - y_1}{(y_2 - y_1) \cdot (M - 1)} \\ k_1 = \frac{y_3 - y_1 \cdot A}{(y_2 - y_1) \cdot (M - 1)^2} \end{cases}, \quad (15)$$

з урахуванням якого, загальна похибка блоків формування тестів буде мати вираз:

$$\Delta = \Delta_A \cdot k_0 + \Delta_M \cdot k_1, \quad (16)$$

Відносна похибка представлена наступним чином:

$$\delta = \frac{1}{A} \cdot \Delta_A - \frac{1}{M - 1} \cdot \Delta_M. \quad (17)$$

Разом з тим, враховуючи, що результат вимірювання залежить від параметрів адитивного та мультиплікативного тестів, їх стабільність визначає і результуючу похибку.

Постановка завдання. Дослідити методи корекції похибки. Запропонувати вдосконалення тестового методу корегування похибки у складі інформаційної системи.

Вдосконалення тестового методу. Враховуючи, що точність тестового методу залежить від точності адитивного та мультиплікативного тестів, вдосконалення такого методу може полягати розробці алгоритму, що дозволить усунути вплив параметрів тестів на результат вимірювань. Це, в свою чергу дозволить створювати вимірювальні системи, які мають більш високу точність.

Усунення впливу параметра мультиплікативного тесту може бути здійснено із додаванням додаткового перетворення. В такому випадку вимірювальний процес буде складатися із чотирьох тактів. Відмінність від класичної схеми (рис. 5), буде полягати у додаванні четвертого такту, де при замкнутому ключі S_2 будуть замикатися ключі S_1 та S_3 . В такому випадку до входу вимірювального перетворювача буде підключений тест типу $M \cdot (x + A)$:

$$Y = \frac{y_3 - y_2}{(y_3' - y_2') - (y_3 - y_2)} \cdot M, \quad (14)$$

де y_2 – результат перетворення вимірюваної величини;

y_3, y_2', y_3' – результати перетворення тестів $M \cdot x; x + A; M \cdot (x + A)$. В такому випадку, результат виміру не залежить від коефіцієнта M мультиплікативного перетворення, але залежить від параметра адитивного A , адитивного тесту.

Усунення впливу параметра адитивного тесту може бути здійснено шляхом введення зворотного перетворювача, вихідний сигнал в такому випадку буде мати вигляд:

$$Y = \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} \cdot \frac{\beta \cdot y_2}{M}, \quad (15)$$

де β – коефіцієнт перетворення зворотного перетворювача.

Усунення параметрів адитивного та мультиплікативного впливу параметрів тестів може бути реалізовано із додаванням двох зворотних перетворювачів (рис. 6)

перетворення засобів вимірювання під час виконання циклу спеціально організованих вимірів.

Запропонований спосіб усунення впливу параметрів адитивної та мультиплікативної складової вимірювання на точність тестового методу шляхом створення додаткових зворотних перетворювачів та системи рівнянь, що описують перетворення вхідних величин вимірювального перетворювача в кожному такті вимірювання, може використовуватись для отримання скоригованого значення вимірювальної величини.

Список літератури

1. Кулинич Ю.М., Тепляков А.Н. Электрические измерения: учеб. пособие. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2018. 114 с.
2. Метрологія у галузі зв'язку. Книга 1. Загальні електрорадіовимірювання: посіб. / Л.В. Коломієць та ін. Одеса: ТОВ «ВМВ», 2009. 480 с.
3. Shi, D., Tylavsky, D. J., & Logic, N. (2012). An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1575-1583.
4. Кириченко Е. Эффективность аддитивной и мультипликативной коррекции погрешностей при диагностировании. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні : наук.-техн. зб.* 2003. Вип. 6. С. 20-24.
5. Купер В. Я., Рубцов М. Г. Алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* 2010. 7. С. 67-72.
6. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. М.: Энергия, 1978. 176 с.

References

1. Kulinich YU.M., Teplyakov A.N. (2018) Elektricheskiye izmereniya [Electrical measurements]. *Ucheb. posobiye*, Moscow : FGBU DPO «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» [in Russian].
2. Balashov, V.O., Dashchenko, O.F. & Kvasnikov, V.P. (2009). *Metrolohiya u haluzi zv'yazku. Zahal'ni elektroradiovymiryuvannya* [Metrology in the field of communication. General electroradio measurements]. TOV «VMV», Knyha 1, P. 480. [in Ukraine]
3. Shi, D., Tylavsky, D. J., & Logic, N. (2012). An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1575-1583. [in English].
4. Kirichenko, Ye. (2003) Effektivnost' additivnoy i mul'tiplikativnoy korrektsii pogreshnostey pri diagnostirovani [Effectiveness of additive and multiplicative correction of errors in diagnosis]. *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennya systemy zakhystu informatsiyi v Ukrayini: naukovotekhnichnyy zbirnyk – Legal, regulatory and metrological support of the information protection system in Ukraine: science and technology. coll, Vol. 6*, 20-24. [in Ukraine]
5. Kuper, V.YA. & Rubtsov, M.G. (2010). Algoritmicheskiye metody povysheniya tochnosti izmereniy na osnove obratnykh interpolyatsionnykh modeley [Algorithmic methods for improving the accuracy of measurements based on inverse interpolation models]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki – Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical sciences, Vol. 7*, 67-72 [in Russian]
6. Bromberg, E.M. & Kulikovskiy, K.L. (1978). *Testovyye metody povysheniya tochnosti izmereniy* [Test methods for improving the accuracy of measurements]. Moscow: Energiya [in Russian]

Dmytro Kvashuk, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Vasyl Yegunko**, Head of Department
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Analysis of Methods of Error Correction of Measuring Devices

The article is devoted to the study of methods for correcting errors of measuring devices. Features of the application of correction of multiplicative and additive component errors are considered. The article investigated the methods of correcting the errors of the measuring instruments as part of the measuring systems. This made it possible to find ways to improve the accuracy of measurements. Sample signal methods and test methods based

on the functional transformation of measuring devices during a cycle of specially organized measurements were studied.

An analysis of various error correction methods caused by static and dynamic factors has been carried out. Literary sources were studied, which consider ways to eliminate the influence of instrumental error. Thus, to eliminate the instrumental error, separate correction coefficients representing the relative values of the probabilities of erroneous decisions were considered. During the study, inverse mathematical models of measuring channels were considered, as which Lagrange interpolation polynomials are used.

A method of eliminating the influence of the parameters of the additive and multiplicative component of the measurement on the accuracy of the test method is proposed by creating additional inverse converters and a system of equations describing the transformation of the input values of the measuring converter in each measuring cycle, which can be used to obtain the adjusted value of the measured value. The effectiveness of this improvement for use as part of the information and measurement system is substantiated. It is shown that the most important directions for improving the efficiency of such a system are the provision of the necessary experimental base, as well as the accuracy of setting correction algorithms.

error, measurement, error correction, regulation, transducer, feedback

Одержано (Received) 04.07.2022

Прорецензовано (Reviewed) 06.08.2022

Прийнято до друку (Approved) 26.09.2022