

# МЕТРОЛОГІЯ, ЯКІСТЬ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПОХИБОК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ANALYSIS OF INSTANT CONTROL METHODS OF MEASURING INSTRUMENTS ERRORS

*Микийчук М. М., д-р техн. наук, проф., Репетило Х. І.,  
Приймачук І. М., Хома Ю. В., канд. техн. наук, асист.*

*Національний університет «Львівська політехніка», кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,  
Україна; e-mail: khrystyna.repetylo@gmail.com*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.052>

**Анотація.** Запропоновано методи оперативного контролю метрологічних характеристик засобів вимірювань для підвищення достовірності вимірювань у промисловості та для зменшення витрат на підтвердження їхньої метрологічної відповідності. Акцентовано на залежності рівня витрат від точності та надійності вимірювань, на основі яких приймають рішення щодо функціонування процесів, оскільки вони впливають на якість продукції.

Обґрунтовано підвищення ролі комплексу організаційно-технічних заходів із забезпечення певної метрологічної автономності окремих виробництв, що дасть змогу зменшити затрати на метрологічне забезпечення виробництва за дотримання необхідного рівня єдності, точності та вірогідності вимірювань. Для зменшення частки метрологічно несправних ЗВ, які експлуатуються в промисловості, в технологічних процесах та для підвищення достовірності вимірювань, запропоновано розроблені методи та алгоритми оперативного контролю метрологічних характеристик засобів вимірювань. Такі методи повинні характеризуватися здатністю їх виконання у будь-який момент часу, відповідністю їх оцінок встановленому рівню вірогідності, сумісністю складових системи та їх надійністю, тобто функціонуванням протягом визначеного часу без погіршення метрологічних характеристик. В статті визначено умови ефективного використання методів оперативного контролю похибок.

Розглянуто доцільність застосування таких методів, як: метод зв'язь за спільним джерелом сигналу; метод взаємних зв'язь; метод зв'язь за стабільним ЗВ; метод зв'язь за допомогою калібратора. Метод з використанням промислового калібратора є найефективнішим методом оперативного контролю похибок, що підтверджують дослідження.

**Ключові слова:** метрологічна надійність, оперативний контроль, контроль метрологічних характеристик, метрологічна автономність.

**Annotation.** The purpose of organizing an effective measurement process is to provide an optimal combination of the measuring instruments quality and the quality of measurements. To increase the reliability of measurements in industry and to reduce the cost of confirming their metrological compliance, methods of instant control of measuring instruments metrological characteristics are proposed. Attention is focused on the dependence of the level of costs on the accuracy and reliability of measurements. The last are based on decisions devoted to the operating processes.

It is ensured the certain metrological autonomy of individual industries, which allow reducing costs for the metrological maintenance of production while the necessary level of unity, accuracy and reliability of measurements is justified.

In the general case, depending on the place of application in the measurement, methods for increasing the accuracy of measurements can be divided into two groups: methods for increasing the accuracy of measuring instrument; methods for increasing the accuracy of measurement results. The first group is characterized by stabilization of the transformation function of measuring instruments. It is also divided into two methods categories. The first of them is the improvement of measuring instruments aiming the increase of the measurements quality. The second one is increasing the quality of measuring instruments. There exist the ways to stabilize the transformation function: design and technology that form the best protection against interference. They are the application of a more advanced elemental base; structural-algorithmic stabilizing the transformation function of measuring instruments, and results processing. The second group combines the methods of stabilizing the output signal of measuring instruments. Stabilization is achieved by means of various metrological tests of instruments, which are aimed at establishing the real metrological properties of a particular instrument. Based on the results of these tests, adjustment of the measuring instruments can be applied.

A lot of methods [1–5] have been devoted to improve the metrological quality of measuring instruments. Within the framework of this paper, it is important to determine quality enhancing ways of instruments while operating. Effective way to improve the quality of operation is to increase the calibration frequency of measuring instruments with more accurate means of measurement or calibrator aiming the determining and excluding the systematic error. Analysis of the calibration effect on the metrological reliability of instruments carried out previously represents the most effective of the mentioned methods. One of them seems to be the built-in calibration element for each measurement cycle. It may be recommended the periodic control by an external measure.

Development methods and algorithms for instant control of metrological characteristics of measuring instruments are proposed. Methods are important to reduce the degradation of measuring instruments in industry. Also, they are aimed at enhancement of measurements exactness.

Article assesses the conditions for effective applying the instant control methods of uncertainties. The expediency of such methods, as the method of verification of the common signal source; the method of mutual recognition; method of verification using high-stable measuring instrument; method of verification with a calibrator, is considered. The last one is the most effective method efficiency of which is proven by current research.

**Key words:** metrological reliability, instant control, control of metrological characteristics, metrological autonomy.

## Вступ

Невідповідність вірогідності вимірювань призводить до витрат, пов'язаних із ризиками споживача та виробника. Для їх мінімізації підприємству необхідно своєчасно і в найкоротші терміни приймати рішення щодо функціонування процесів, котрі є визначальними для якості продукції. Рішення приймають на основі вимірювань, і саме від їх точності та надійності залежить рівень витрат. З іншого боку, забезпечення найвищих показників потребує великих витрат.

Вірогідність ґрунтується на понятті єдності вимірювань, що досягається точним відтворенням та зберіганням еталонами встановлених одиниць фізичних величин і передаванням їхніх розмірів робочим засобам вимірювань (ЗВ).

В умовах значного зношення еталонної бази, зростання цін на метрологічні послуги істотно підвищується роль комплексу організаційно-технічних заходів із забезпечення певної метрологічної автономності окремих виробництв, що дасть змогу зменшити витрати на метрологічне забезпечення виробництва із підтриманням необхідного рівня єдності, точності та вірогідності вимірювань.

## Недоліки

Недоліком прийнятого методу встановлення міжкалібрувальних інтервалів є застосування одного інтервалу для однотипних ЗВ, проте не беруть до уваги особливості застосування окремого ЗВ. З огляду на використання у промисловості виникають питання інших категорій, що впливають на вибір інтервалів. З одного боку, калібрування призводить до зупинки ТП, тобто простою, що спричиняє витрати. З іншого боку, через недостовірність результатів вимірювань виникають витрати. В першому випадку прагнуть до збільшення міжкалібрувального інтервалу, в другому – до зменшення.

Однак початкових даних для коректного і однозначного вирішення цього завдання, як правило, недостатньо. РМГ 74 [6] рекомендує використовувати залежність середніх економічних втрат від похибок ЗВ. Однак важко виявити таку залежність для більшості типів ЗВ, за умови, що різні екземпляри ЗВ того самого типу використовують для різних цілей, а тому і наслідки від недостовірних ре-

зультатів вимірювань, виконаних за допомогою таких ЗВ, можуть відрізнятись в сотні й тисячі разів.

Саме через відсутність інформації (про тимчасову нестабільність компонентів ЗВ, про умови й інтенсивність їх застосування, про економічні наслідки від недостовірних результатів вимірювань тощо), потрібної для розрахунків, недоцільно застосовувати такі складні й трудомісткі методи на практиці, оскільки вони, на жаль, не забезпечують необхідної вірогідності [7]. Призначення міжкалібрувальних інтервалів у результаті порівняння з міжкалібрувальними інтервалами аналогічних ЗВ (в умовах конкурентної боротьби фірм-виробників ЗВ) призводить до встановлення неправдоподібно тривалих міжкалібрувальних інтервалів на багато типів ЗВ.

Обмежує сферу застосування доволі розвиненої й водночас складної теорії метрологічної надійності під час призначення первинного міжкалібрувального інтервалу і його коригування на етапі експлуатації [7] недостатність даних, котрі можна отримати в повсякденній практиці.

## Мета роботи

Мета роботи – здійснення класифікації та обґрунтування методів оперативного контролю метрологічних характеристик ЗВ для підвищення достовірності вимірювань у промисловості та для зменшення витрат на підтвердження їхньої метрологічної відповідності.

## Матеріали та методи

Підвищення метрологічної надійності є актуальним питанням. У низці наукових робіт розглянуто методи її збільшення, проте досі не сформовано чіткої теорії та структуризації цих методів.

В загальному випадку, залежно від місця застосування у вимірювальному процесі, методи підвищення точності вимірювань можна розділити на дві групи:

- методи підвищення точності ЗВ;
- методи підвищення точності результатів вимірювань.

Перша група характеризується стабілізацією функції перетворення ЗВ і поділяється також на дві категорії методів. Перші спрямовані на удосконалення

ЗВ для покращення якості вимірювань, другі – на поліпшення якості експлуатації ЗВ. Є такі способи стабілізації функції перетворення:

– конструкторсько-технологічні – кращий захист від завод, використання досконалішої елементної бази;

– структурно-алгоритмічні – структурна стабілізація функції перетворення ЗВ, внутрішня математична обробка вимірювальної інформації.

Друга група об'єднує методи стабілізації вихідного сигналу ЗВ, якої досягають за допомогою різноманітних метрологічних випробувань ЗВ, спрямованих на встановлення реальних метрологічних властивостей конкретного ЗВ. За результатами цих випробувань можуть вводитися поправки до результатів вимірювань ЗВ.

Методи поліпшення метрологічної якості ЗВ розглянуто в багатьох роботах [1–5], в межах цієї роботи важливо визначити способи підвищення якості ЗВ під час їх експлуатації.

Одним з найефективніших способів поліпшення якості експлуатації є підвищення частоти калібрування ЗВ звірянням з точнішим ЗВ чи калібратором з метою визначення і унеможливлення систематичної похибки.

Проведений в [1] аналіз впливу калібрування на метрологічну надійність ЗВ показав, що найефективнішими з них є два способи реалізації: у кожному циклі вимірювань за вбудованим опорним елементом або періодично за зовнішнім еталоном. Мета організації ефективного вимірювального процесу – забезпечити оптимальне поєднання якості ЗВ та якості експлуатації ЗВ.

Для прогнозування справності ЗВ необхідно використовувати дані протоколів метрологічних перевірок.

Інформація, яку можна отримати з протоколів, неоднакова для різних способів перевірки. Відповідно до РМГ 74 [6] розрізняють три способи метрологічної перевірки:

– перший – встановлення дійсних значень фізичних величин (градування), приписаних ЗВ, що перевіряються, у точках діапазону вимірювань;

– другий – визначення придатності до застосування за нормами стабільності із подальшим градуванням ЗВ, визнаних придатними;

– третій – визначення придатності до застосування із бракуванням тих ЗВ, похибки яких перевищують допустиму межу.

Використовуваний для робочих еталонів другий спосіб перевірки забезпечує оцінювання метрологічної стабільності, яку встановлюють, порівнюючи нестабільність ЗВ, отриману в результаті перевірки, з прийнятими значеннями. Після цього

здійснюється передавання розміру одиниці фізичної величини від еталону.

Для робочих еталонів також використовується і перший спосіб перевірки, але його реалізація можлива в двох варіантах. За першим варіантом встановлюють дійсні значення фізичних величин, приписані ЗВ (як, наприклад, у випадку з однозначними мірами – гирею, котушкою опорів тощо). Це дає можливість за результатами декількох перевірок отримати залежність дійсних значень фізичних величин, приписаних ЗВ, від часу, а отже, оцінити нестабільність ЗВ і правильність призначення міжкалібрувального інтервалу. А якщо під час перевірки тільки передається розмір одиниці фізичної величини від еталона (як, наприклад, у разі передавання розміру від гирі вагам, від однозначної міри напруги калібратору) без встановлення дійсного значення фізичної величини на момент проведення перевірки, оцінити нестабільність ЗВ неможливо. Отже, в цьому випадку отримати достовірну інформацію про поточний рівень метрологічної справності конкретного ЗВ також неможливо.

За третім способом перевірки здійснюється контроль за альтернативною ознакою (придатний – не придатний) без наведення кількісних оцінок, що отримують для сукупності ЗВ за результатами оцінювання коефіцієнта (чи імовірності) метрологічної справності [1, 7]. Зрозуміло, що це знижує достовірність оцінювання метрологічної справності.

Для зменшення частки метрологічно несправних ЗВ, які експлуатуються в промисловості, в технологічних процесах та для підвищення достовірності вимірювань пропонують розробити методи та алгоритми оперативного контролю метрологічних характеристик ЗВ [10].

Вимоги до методів оперативного контролю похибок за [8] такі:

– оперативність: можливість здійснення контролю похибок у будь-який момент часу;

– об'єктивність: відповідність оцінок похибок встановленому рівню вірогідності;

– інтегрованість: сумісність усіх складових системи оперативного контролю під час її функціонування;

– надійність: функціонування системи упродовж визначеного часу без втрати відповідних метрологічних характеристик.

## Результати і обговорення

Використовуючи узагальнення [8], пропонуємо класифікацію методів оперативного контролю похибок (див. таблицю).

**Класифікація методів оперативного контролю МХ ЗВ**  
**Classification of operational control methods**  
**of metrological characteristics measuring instruments**

Ознака	Метод оперативного контролю МХ
За способом контролю	Метод допоміжних вимірювань
	Метод еталонних сигналів
За часом контролю	Неперервного контролю
	Періодичного контролю
За впливом на технологічний процес	З перериванням ТП для вилучення ЗВ на час контролю
	Без переривання ТП для здійснення оперативного контролю МХ ЗВ (бездемонтажний контроль МХ)

Специфікою промислових вимірювань можна вважати спрямованість на зменшення витрат. У такому випадку калібрування повинно здійснюватися з найбільшими інтервалами. Проте для забезпечення ефективності вимірювань необхідно впевнитися у їх достовірності. Беручи до уваги такі дві позиції промислових вимірювань, важливо використовувати методи оперативного контролю похибок. У статті визначено умови їх ефективного використання.

Як показує аналіз [8], бездемонтажний оперативний контроль похибок промислових ЗВ доцільно здійснювати такими методами:

- методом зв'язь за спільним джерелом сигналу;
- методом взаємних зв'язь;
- методом зв'язь за стабільним ЗВ;
- методом зв'язь за допомогою калібруатора.

Якщо можливо від'єднати входи ЗВ від джерел вимірювальних сигналів та одночасно подати на всі входи стабільного сигналу (компактного розміщення ЗВ), можна використовувати метод зв'язь ЗВ з використанням спільного джерела сигналів.

У результаті отримаємо ряд показів цієї сукупності однорідних ЗВ –  $\{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ . Наступним кроком є знаходження середнього арифметичного показів сукупності ЗВ –  $\bar{X}$ , яке приймаємо за опорне значення

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i.$$

Визначивши похибки ЗВ  $\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m\}$  та порівнявши їх значення із допустимими межами для кожного ЗВ, можна виділити з них ті, для яких похибка перевищила допустимі межі, а отже, вони повинні бути вилучені з технологічного процесу (ТП), та підлягають калібруванню.

За відсутності можливості чи недоцільності використання традиційних методів калібрування ЗВ можна розглядати [10] метод колових зв'язь для груп однорідних типів ЗВ.

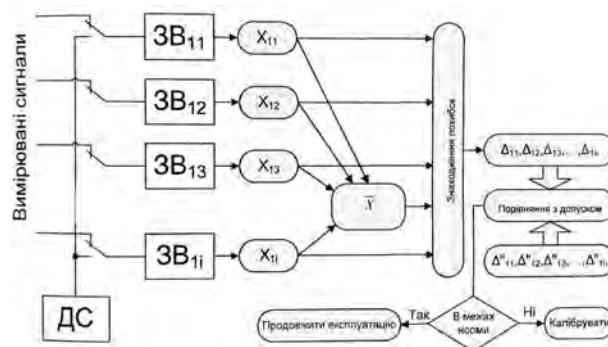


Рис. 1. Метод зв'язь однорідних ЗВ

з використанням спільного джерела сигналу [10]  
 Fig. 1. Method of verification homogeneous measuring instruments using a common signal source [10]

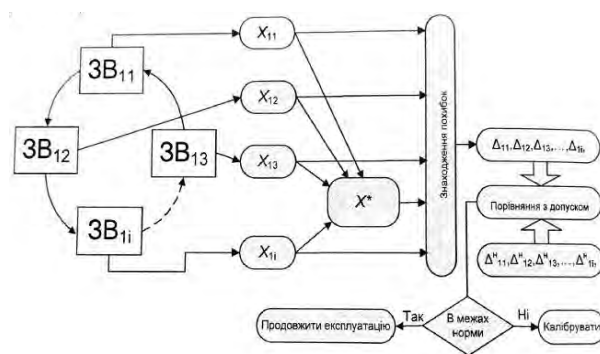


Рис. 2. Метод колових зв'язь у групах однорідних ЗВ [10]

Fig. 2. Method of circle verification in groups of homogeneous measuring instruments [10]

Метод використовується за умови можливості періодичного від'єднання входів ЗВ від джерел вимірювальних сигналів. Для такого варіанта оперативного контролю за опорне значення приймають максимально правдоподібну оцінку результату зв'язь [14]

$$X^* = \arg \max \{p(X_1, \dots, X_j / X)\},$$

де  $X$  – дійсне значення одиниці фізичної величини, що вимірюється під час зв'язь.

Подальше опрацювання результатів здійснюється, як і для попереднього варіанта звірянь.

Якщо ж на підприємстві використовують групи однорідних ЗВ або однорідні ЗВ, розміщені в різних точках ТП, то для оперативного контролю похибок ЗВ доцільно застосовувати метод взаємних звірянь за показом стабільного ЗВ. Необхідна також можливість тривалого відімкнення ЗВ від контрольованого параметра, за умови неможливості калібрування калібраторами.

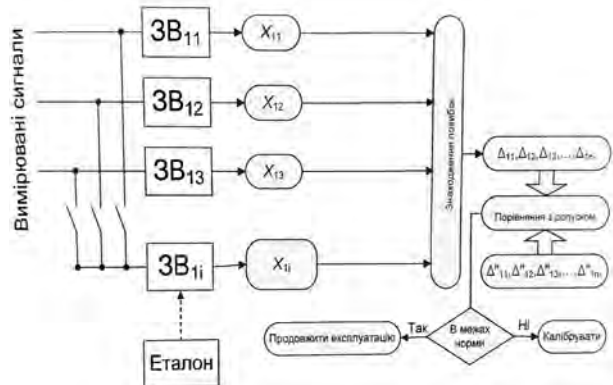


Рис. 3. Метод взаємних звірянь за показом стабільного ЗВ [10]

Fig. 3. The method of mutual verification by a stable measuring instrument [10]

З кожної групи однорідних ЗВ, за результатами їх попереднього контролю та калібрування, потрібно вибрати ЗВ з найменшою похибкою та найвищою стабільністю –  $\{3В_{11}, 3В_{12}, \dots, 3В_{1i}\}$ . Щоб забезпечити простежуваність вимірювань з одиницями фізичних величин, що відтворюються державними еталонами, достатньо здійснити калібрування відібраних найстабільніших  $3В_{1i}$ . Тоді процедура взаємних звірянь полягає в організації паралельних вимірювань стабільним  $3В_{1i}$  та кожним ЗВ із цієї сукупності однорідних ЗВ тієї ж фізичної величини. Приймавши за опорне значення показ  $3В_{1i}$  та опрацювавши результати вимірювань, можна виділити ЗВ, котрі підлягають калібруванню.

Цей метод оперативного контролю за показами стабільного ЗВ підтверджується дослідженнями, проведеними в [9], де показано, що вірогідне оцінювання метрологічної справності ЗВ можна здійснити, забезпечивши співвідношення між похибкою контрольованого та еталонного ЗВ на рівні 1:1,05.

Дослідження підтверджують, що метод з використанням промислового калібратора є найефективнішим методом оперативного контролю похибок.

Промисловий калібратор – це ЗВ, використовуваний у процесах метрологічного підтвердження на виробництві. Вимоги до промислового калібратора можна сформулювати так:

- відтворення зразкових сигналів, необхідних для калібрування всіх ЗВ, що використовуються у ТП;

- забезпечення необхідної точності передавання одиниць фізичних величин у цьому ТП;

- інваріантність до впливу умов застосування ЗВ у ТП.

Звіряння ЗВ за допомогою промислового калібратора забезпечують найвищий ступінь єдності вимірювань у виробництві, а отже, й високу вірогідність їх результатів. Широке його впровадження у ТП стримується відсутністю ПК, які б відповідали сформульованим вище вимогам.

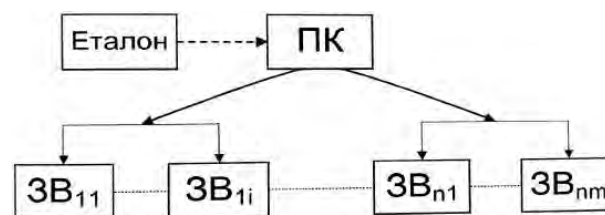


Рис. 4. Метод звірянь ЗВ за допомогою промислового калібратора [10]

Fig. 4. Method of verification measuring instruments by industrial calibrator [10]

## Висновки

Запропоновані методи оперативного контролю метрологічних характеристик промислових ЗВ допоможуть підвищити точність відтворення, зберігання і передавання розмірів широкого класу одиниць фізичних величин в умовах автономного метрологічного обслуговування ЗВ і зменшити економічні витрати під час експлуатації вимірвальної техніки в промислових умовах.

Для упровадження методів бездемонтажного оперативного контролю ЗВ необхідно гармонізувати нормативно-методичне забезпечення у промисловості із сучасними вимогами до організації вимірювань, необхідно розробити калібратори, які забезпечать відтворення зразкових сигналів, належну точність та інваріантність до умов застосування ЗВ.

## Список літератури

1. Фридман А. Э. Теория метрологической надежности средств измерений и других технических средств, имеющих точностные характеристики: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1994 – 423 с.
2. Новицкий П. В. Динамика погрешностей средств измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф, В. С. Лабунец. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
3. Степанов О. С. Разработка и исследование научно-технических основ метрологического обеспечения производства и эксплуатации счётчиков воды / О. С. Степанов // дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИМС, 2004. – 147 с.

4. Огірко Р. М. Принципи побудови універсальних вимірювальних засобів автоматизації технологічних процесів / Р. М. Огірко, М. М. Микійчук // Вимірювальна техніка і метрологія. – Львів, 2002. – № 59. – С. 145–156.
5. Яцук В. О. Розвиток теорії та методів підвищення якості засобів вимірювальної техніки з використанням кодированих: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Львів, 2004 р.
6. РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. 2005-05-26. – М.: Стандартинформ, 2004. – 59 с.
7. Данилов А. Е. Хорош ли продолжительный межповерочный интервал для теплосчётчиков при расширенном диапазоне измерения расхода / А. Е. Данилов, И. Н. Бригаденко, Г. Н. Иванова, Е. Ю. Парамонова // Энергосбережение. – 2003. – № 5. – С. 17.
8. Микійчук М. М. Підвищення метрологічної автономності локальних систем вимірювань [Текст] / М. М. Микійчук, П. Г. Столярчук // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2011. – Вип. 1 (27). – С. 222–225.
9. Владимиров В. Л. Теоретические основы, методы и алгоритмы автоматизированной поверки средств измерений электрических величин: дисс. ...д-ра техн. наук. – Львов, 1990. – 255 с.
10. Микійчук М. М. Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення: автореф. дис. ...д-ра техн. наук. : 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення / Микола Миколайович Микійчук; Національний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2012. – 40 с.
2. Novitsky P. V. (1990). Dynamics of errors in measuring instruments. P. V. Novitsky, I. A. Zograf, V. S. Labunets, – L.: Energoatomizdat. – 192 p.
3. Stepanov O. S. (2004). Development and research of scientific and technical foundations of metrological support of production and operation of water meters. O. S. Stepanov, Diss. on sos. uch. Art. Ph.D. – M.: VNIIMS, – 147 p.
4. Ogirko R. M. (2002). Principles of the motivation of universal varieties of automation of technological processes. R. M. Ogirko, M. M. Mykyychuk // Technical literature and metrology. – Lviv. – No. 59. – P. 145–156.
5. Yatsuk V. O. (2004). Development of the theory and methods of improving the quality of measuring equipment with the use of coderometry measures / B. O. Yatsuk: Autoref. dissert. Doct. tech. Sciences – Lviv, ( in Ukrainian).
6. RMG 74-2004 GSI. Methods for determining the calibration and intercalibration intervals of measuring instruments. 2005-05-26. Moscow: Standartinform. – 59 p.
7. Danilov A. E. (2003). Is the test interval for heat meters long with an extended range of flow measurement good / A. E. Danilov, I. N. Brigadenko, G. N. Ivanova, E. Yu. Paramonova, Energy saving, No. 5 – P. 17.
8. Mykyychuk M. M. (2011). Increase of metrological autonomy of local measurement systems. M. M. Mykyychuk, P. G. Stolyarchuk, Collection of scientific work of Kharkiv university of air forces. Issue 1 (27). – P. 222–225.
9. Vladimirov V. V.(1990) Theoretical bases, methods and algorithms for automated verification of measuring means of electrical quantitie. V. L. Vladimirov, Dis. Doct. tech. sciences. – Lviv. – 255 p.
10. Mykyychuk M. M. (2012). The metrology providing of quality of products on the stage of making. Thesis for a doctor's degree by specialty 05.01.02 – Standardization, Certification and Metrological Assurance. Lviv Polytechnic National University.

## References

1. Fridman A. E. (1994). The theory of metrological reliability of measuring instruments and other technical means with precision characteristics. Dis. Doct. tech. sciences. – M. – 423 p.