

**С. Ю. Чайковський**

старший науковий співробітник випробувальної лабораторії  
Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби  
безпеки України  
ORCID 0000-0002-2891-0845

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОРИГУВАННЯ ПЕРІОДУ КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДУ РЕАКЦІЇ

У статті проведено дослідження методу коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції. Структуровано поняття калібрування та підходів до здійснення повірок. Визначено основні складові впливу кількості повірок на загальний цикл виробництва. Детально описано етапи та принципи проведення коригування періоду калібрування вимірювального обладнання від визначення необхідної кількості одиниць засобів вимірювального обладнання для випробування до механізмів застосування математичної статистики до отриманих значень, з метою знаходження вибіркового середнього та вибіркового стандартного відхилення, враховуючи результати нестабільності, які перевищують інтервали, та ґрунтуючись на вибірковій характеристиці розподілу нестабільності метрологічних ознак одиниць вимірювального обладнання. У якості вимірювального приладу для проведення дослідження обрано вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116. Зазначено, що метод коригування періоду калібрування базується на методі реакції в основі якого лежить дослідження параметрів приладу відповідно до умов, що змінюються. Підкреслено, що зміна умов експлуатації полягає у перетворенні імпедансу порту, включенні ланцюга та виключенні останнього. Сформовано схеми реалізації кожного підходу. Математично обґрунтовано принципи роботи з вибіркою отриманих значень та їх обробка відповідно до методу коригування періоду калібрування вимірювального приладу. Проведено групування отриманих значень за порядковими номерами перевірок, починаючи з виготовлення або ремонту вимірювального обладнання з метою коригування періоду калібрування. У табличній формі представлено результати випробувань тридцяти вимірювачів комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) з якими, із застосування статистичної обробки результатів інтервалу охоплення для кожної групи здійснено прорахунок основних математичних показників. Представлено, на основі розрахунку систему рівнянь, вирішення якої дозволило отримати значення коефіцієнтів необхідних для встановлення періоду калібрування. Порівнюючи отримані результати із заявленими у технічній документації виробником, підкреслено, що необхідність коригування періоду калібрування вимірювального обладнання є беззаперечним фактом, так як підвищення періоду є економічно вигідним для підприємства яке використовує дане обладнання у власному виробництві.

*Ключові слова:* коригування, метод, період, вимірювальне обладнання, калібрування, повірка, реакція.

**S. Tchaikovsky**

## INVESTIGATION OF THE METHOD OF ADJUSTING THE CALIBRATION PERIOD OF MEASURING EQUIPMENT BASED ON THE REACTION METHOD

The article investigates the method of adjusting the calibration period of measuring equipment based on the reaction method. The concept of calibration and approaches to calibration is structured. The main components of the influence of the number of calibrations on the overall production cycle are determined. The stages and principles of adjusting the calibration period of measuring equipment from determining the required number of units of measuring equipment for testing to the mechanisms of application of mathematical statistics to the obtained values, in order to find the sample mean and sample standard deviation, taking into account instability on the sample characteristics of the distribution of instability of metrological features of measuring equipment units. A meter of complex transmission coefficients (vector circuit analyzer) P2-116 was chosen as a measuring device for the study. It is noted that the method of adjusting the calibration period is based on the method of reactions, which is based on the study of the parameters of the device in accordance with changing conditions. It is emphasized that the change in operating conditions is to convert the port impedance, turn on the circuit and turn it off. Schemes of realization of each approach are formed. The principles of work with sampling of the received values and their processing according to a method of adjustment of the period of calibration of the measuring instrument are mathematically substantiated. The obtained values were grouped by serial numbers of inspections, starting with the manufacture or repair of measuring equipment in order to adjust the calibration period. The tabular form presents the test results of thirty meters of complex transmission coefficients (vector circuit analyzer) with which, using statistical processing of the results of the coverage interval for each group, the calculation of basic mathematical indicators. Based on the calculation, a system of equations is presented, the solution of which allowed to obtain the values of the coefficients required to establish the calibration period. Comparing the results with those stated in the technical documentation by the manufacturer, it is emphasized that the need to adjust the calibration period of measuring equipment is an indisputable fact, as increasing the period is cost-effective for the company that uses this equipment in its own production.

*Key words:* adjustment, method, period, measuring equipment, calibration, verification, reaction.

**Вступ та постановка завдання.** Загально визнаним підходом до проведення калібрування є здійснення сукупності операцій направлених на встановлення взаємозв'язку між значеннями величин, що вказуються вимірювальним приладом або вимірювальною системою, або значеннями,

представленими мірою матеріалу або еталонним матеріалом, та відповідними значенням, що реалізуються стандартами, з урахуванням умов експлуатації обладнання та відповідно до умов за яких проводиться дослідження [1].

Питання здійснення калібрування вимірювального обладнання охоплює різні підходи до калібрування, які можна вивчати з «метрологічного» або «методологічного» погляду. Метрологічний підхід ґрунтується на значеннях та властивостях фізичних і хімічних вимірів, на базі методу проводиться вимірювання / розрахунок різниці між прямим і непрямим калібруванням, а потім між калібруванням обладнання та калібруванням процесу. При прямому калібруванні (також відомому як абсолютне калібрування) значення еталона (контрольне значення) виражається в тій же величині, що і вимірювання обладнання (наприклад, калібрування ваг при гравіметричному визначенні), тоді як при непрямому (або відносному) калібруванні, значення еталона величини розраховується відповідно до одиниці виміру відмінного від початкового та кінцевого значення.

Період проведення калібрування визначається відповідно до атестації оцінки засобів вимірювальної техніки за існуючою системою забезпечення єдності вимірювань, проте деякі компанії настільки суворо дотримуються графіків калібрування, що часто калібрують обладнання в надмірній кількості. Беззаперечно це допомагає уникнути виробництва неякісних деталей, однак непотрібні калібрування також збільшують витрати.

Процедура визначення та регулювання періоду калібрування вимірювального обладнання є трудомісткою та складною задачею, вирішення якої дозволить скоротити витрати та підвищити якість продукції, що випускається.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні наукові публікації за темою дослідження направлено на розкриття принципів та методологій застосування обладнання для калібрування.

В. І. Цвіліховський та В. А. Томчук [2] обговорили питання щодо критеріїв вибору методу дослідження в діагностичних лабораторіях згідно організаційної, аналітичної та діагностичної точок зору. Автори звернули увагу на міжнародні терміни та визначення правильності та відтворюваності вимірювань, чутливості та специфічності методу кількісного визначення аналізу.

Коригування між калібрувальних інтервалів вимірювального обладнання розглянули О. Косарева та О. Дзябенко [3]. Науковцями запропоновано методику встановлення і коригування міжкалібрувальних інтервалів еталонів та вимірювального обладнання, яке використовується під час проведення калібрування і випробувань у лабораторіях підприємства у відповідності з вимогами національних та міжнародних стандартів.

І. О. Потоцький [4] розробив методи визначення інтервалів між калібруваннями (міжкалібрувальних інтервалів) робочих еталонів та засобів вимірювальної техніки, які застосовуються у випробувальних та калібрувальних лабораторіях, спрямована на забезпечення метрологічної простежуваності, точності та достовірності результатів вимірювань.

Метод коригування міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювань дослідили В.С. Єременко, В.М. Мокійчук та О.О. Редько [5]. Авторами пропонується метод встановлення міжкалібрувальних інтервалів, який полягає у використанні даних калібрувань та проміжних перевірянь вимірювального устаткування. Розроблено програмний продукт, який реалізує запропонований метод, буде корисний у застосуванні випробувальними лабораторіями різних сфер діяльності.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Zhang Ting & Li Sheng & Liu Jixin & Xia Jianchao & He Chuyao [6], Gong Chengcheng & Wang Wenke & Zhang Zaiyong & Franssen Harrie-Jan & Cochand Fabien & Brunner Philip [7], Zhang Xinrui & Wu Sa & Li Tao [8], Moeck Christian & Freyberg Jana & Schirmer Mario [9], Tuenge Jason & Poplawski Michael [10], Sun Jingxia & Zhang Aimin & Gong Guoqiang & Jiang Jian [11], Krndija Mladjen & Latinović Marina & Broćeta Gordana & Savić Gojko [12], Wang Jing & Zhang Qi [13], Kawalec Małgorzata & Czerwińska Karolina & Pacana Andrzej [14], Myers Daniel & Ficklin Darren & Robeson Scott & Neupane Ram & Botero Acosta Alejandra & Avellaneda Pedro [15] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання дослідження методу коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Дослідити метод коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Метод коригування періоду калібрування вимірювального обладнання реалізується за кілька етапів.

Одним з головних є формування вимірюваної величини засобів вимірювального обладнання для випробування. Кількість вимірювального обладнання, яке входить до вибірки коригування періоду калібрування, повинно становити не менше 30 одиниць. Кожна група одиниць вимірювального обладнання може складатися з неідентичного обладнання проте такого, що є близьким за призначенням, конструкцією, технологією виготовлення або умовами застосування. За умови максимальної схожості випробувальних одиниць, результати їх випробування можуть бути включені в той самий ряд результатів, на основі яких і буде сформовано еталон калібрування вимірювального обладнання.

Наступним кроком, є випробування у навантаженому режимі, нормальному режимі та прискореному. Тут головною умовою є вимірювання перевірених параметрів при однакових термінах служби або експлуатації групи зразків направлених на встановлення значення еталону.

Встановлення періоду тривалості випробування, здійснюється за рахунок простої лінійної моделі прогнозування із застосуванням методу найменших квадратів, який для більшої точності вимагає мінімум 3 груп множинного вимірювання. Таким чином, тривалість випробування має бути не менше  $2\Delta t$ , де  $\Delta t$  – початковий інтервал калібрування.

Далі, обов'язковим є застосування математичної статистики до отриманих значень, з метою знаходження значень вибіркового середнього та вибіркового стандартного відхилення, враховуючи результати нестабільності, які перевищують інтервали, та ґрунтуючись на вибірковій характеристиці розподілу нестабільності метрологічних ознак одиниць вимірювального обладнання.

На основі отриманих математичних значень будується функція залежності від часу значень вибіркового середнього та вибіркового стандартного відхилення. Коефіцієнти поліноміального рівняння підбираються із застосуванням методу найменших квадратів. Поліноміальний порядок вибирається з варіантів 1...5 за критерієм апроксимації мінімальної похибки.

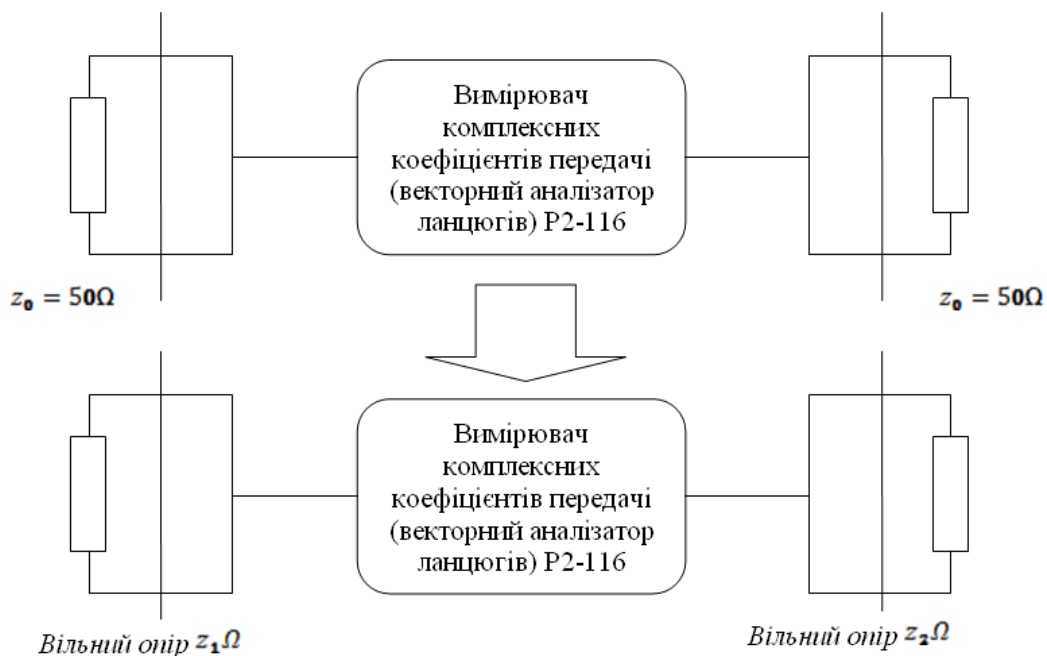


Рис. 1. Схема реалізації методу перетворення імпедансу порту

У рамках даної роботи, у якості вимірювального приладу для проведення дослідження обрано вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116. Метод коригування періоду калібрування вимірювального приладу базується на методі реакцій в основі якого лежить дослідження параметрів приладу відповідно до умов, що змінюються. Зміна умов експлуатації полягає у перетворенні імпедансу порту, включенні ланцюга та виключенні останнього. На рисунку 1 наведено схему реалізації методу перетворення імпедансу порту.

Перетворення імпедансу порту є ефективним методом дослідження параметрів приладу навантажуючи його різними величинами, які є нестандартними для нього.

Реалізація схеми включення ланцюга запропоновано на рисунку 2.

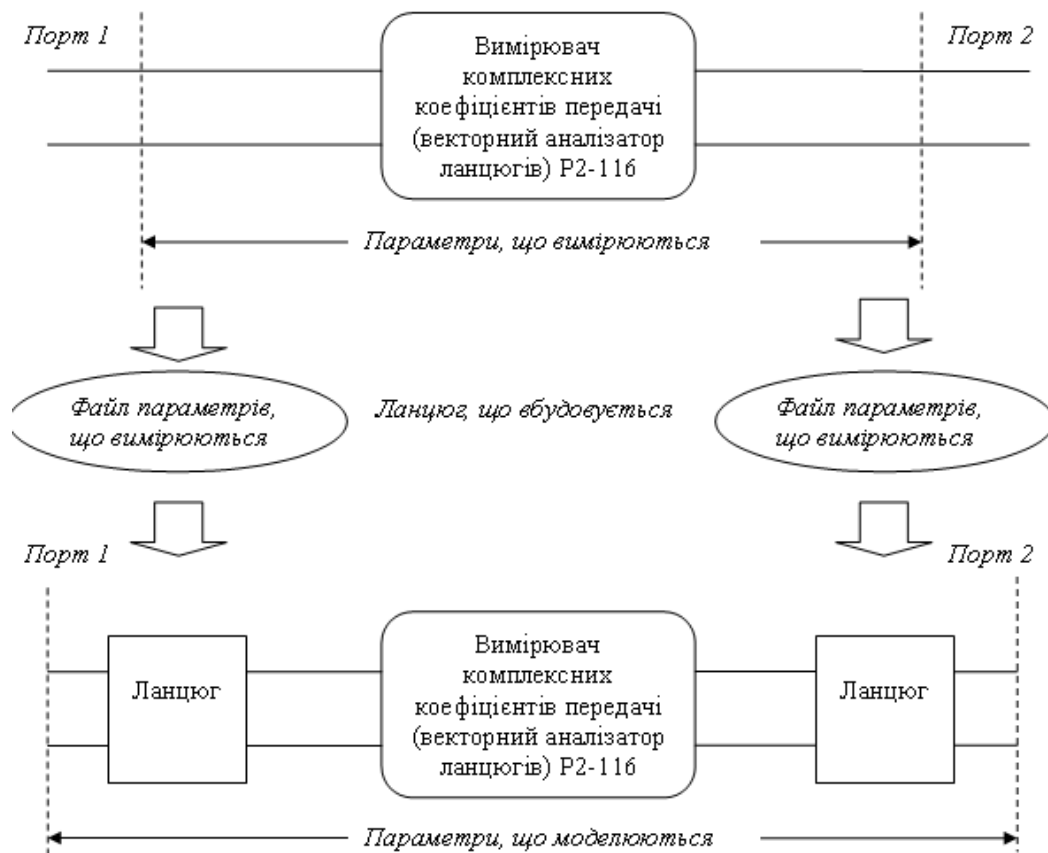


Рис. 2. Схема включення ланцюга

Поширеною сферою застосування включення ланцюгів є розробка ланцюгів узгодження. Для цього розрахункові дані узгоджувального ланцюга включаються до результатів вимірювань і дозволяють спостерігати параметри такого нового узгодженого пристрою.

Функція виключення ланцюга зміщує площину калібрування у напрямку випробуваного пристрою так, як показано на рисунку 3.

Ланцюг, що виключається, повинен бути визначений через файл даних, що містить параметри цього ланцюга. Ці параметри можна отримати прямими точними вимірами, розрахунками чи за результатами комп'ютерного моделювання.

Вибіркою для дослідження послуговували значення випробувань тридцяти вимірювачів комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116. Отримані результати наведено у таблиці 1.

Відповідно до рекомендацій виробника, інтервал калібрування для цього типу обладнання становить дванадцять місяців, а клас точності – 0,5 %.

З метою коригування періоду калібрування результати згруповано за порядковими номерами перевірок, починаючи з виготовлення або ремонту вимірювального обладнання:

1 – засоби вимірювального обладнання, отримані під час першої перевірки після виготовлення або ремонту;

2 – засоби вимірювального обладнання, отримані при другій повірці після виготовлення або ремонту;

інші – за порядковим номером перевірок, виготовлення чи ремонту вимірювального обладнання.

Застосування статистичної обробки результатів інтервалу охоплення для кожної групи дозволяє знайти варіанти узагальненого нормального розподілу метрологічних властивостей (нестабільності засобу вимірювання).

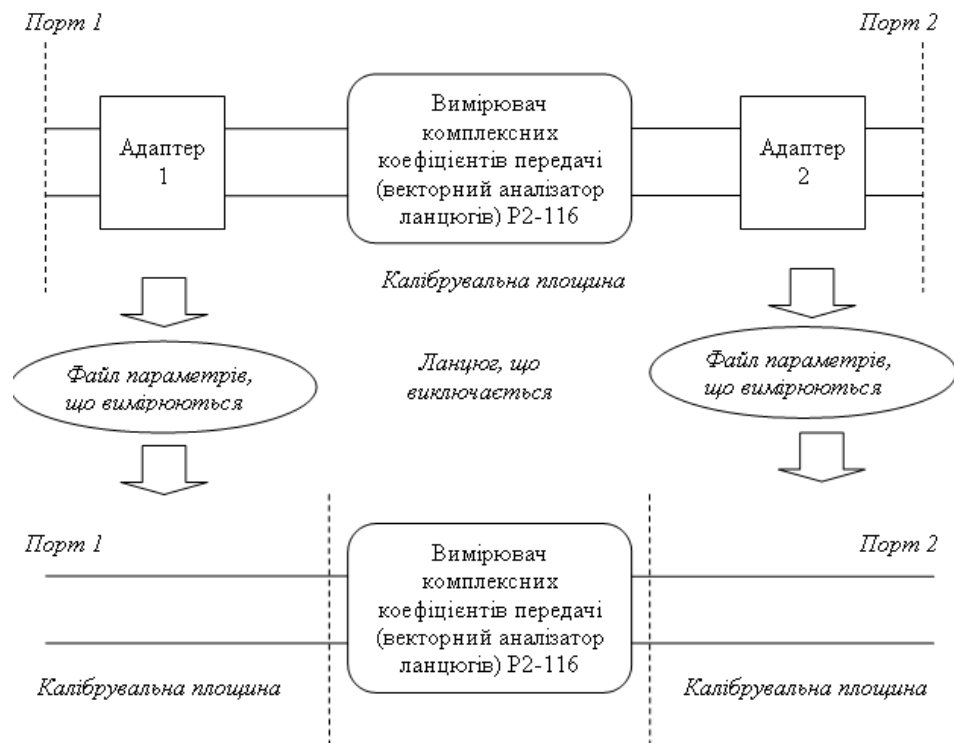


Рис. 3. Схема виключення ланцюга

Табл. 1

**Результати випробувань**

Порядковий номер приладу направлено на повірку	Періоди проведення повірки			
	1	2	3	4
1	0,21	0,2	-0,14	-0,1
2	0,21	0,21	-0,17	-0,1
3	0,21	0,2	0,11	0,1
4	0,22	0,19	0,15	0,1
5	0,2	0,18	0,16	0,1
6	0,2	0,18	0,13	0,12
7	0,21	0,19	0,19	0,19
8	0,21	0,19	0,5	0,51
9	0,21	0,2	0,26	0,52
10	0,2	0,2	0,24	0,51
11	0,2	0,14	0,33	0,11
12	0,22	0,15	-0,11	0,12
13	0,22	0,16	-0,14	0,11
14	0,19	0,14	-0,16	0,19
15	0,2	0,2	0,17	-0,11
16	0,18	0,18	0,18	0,09
17	0,22	0,2	0,2	-0,07
18	0,22	0,21	0,2	0,11
19	0,21	0,2	0,13	0,13
20	0,21	0,18	0,14	0,13
21	0,21	0,18	0,14	0,13
22	0,2	0,19	0,16	0,11
23	0,2	0,19	0,19	0,19
24	0,22	0,2	0,18	-0,19
25	0,22	0,2	0,2	-0,19

26	0,19	0,14	-0,11	0,11
27	0,2	0,15	0,09	0,55
28	0,19	-0,08	-0,07	0,15
29	0,2	0,17	0,11	0,1
30	0,2	0,14	0,13	0,12

Здійснюємо застосування статистичної обробки результатів інтервалу охоплення для кожної групи шляхом побудови матриці  $W$  значень від 0 до 4 з кроком 0,1.

Для кожного значення матриці знаходимо:

$$X_i^W = \text{sign}(x_i | x_i) = 1 \dots n$$

де

$$\text{sign}(x_i), \begin{cases} X_i < 0, \text{sign}(x_i) = -1 \\ X_i = 0, \text{sign}(x_i) = 0 \\ X_i > 0, \text{sign}(x_i) = 1 \end{cases}$$

Значення функції ймовірності розраховується відповідно до рівняння:

$$\ln[K(W)] = n \ln \left[ \frac{|W|}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \right] + (W - 1) \sum_{i=1}^n \ln(|x_i|) - 0,5(n - 1)$$

де  $W$  – показник розподілу.

Отримані значення функції ймовірності відповідають значенню функції максимальної правдоподібності, що є максимально точним наближенням вибіркового розподілу метрологічних властивостей (нестабільності засобу вимірювальної техніки) завдяки нормальному закону розподілу.

Максимальне значення функції  $\ln[K(W)]$  у першій групі досягає  $W = 1,0$ .

Вибіркове (емпіричне) середнє значення вказує на характеристику положення для вибіркового розподілу:

$$\bar{y}_i(H_j) = 1/n \sum_{i=1}^n X_i^W(H_j), j = 1, 2, \dots$$

де  $H_j$  – порядок інтервалу калібрування;

Некореговане стандартне відхилення для вибірки вказує на середнє значення цих спостережень. Розраховується за рівнянням

$$\sigma_i(H_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^W(H_j) - y_i(H_j))^2}{n - 1}}, j = 1, 2, \dots n.$$

Результати математичної обробки даних для чотирьох періодів випробувань тридцяти вимірювачів комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) наведені в таблиці 2.

Табл. 2.

Результати математичної обробки отриманих значень

Математичні показники	Сформовані групи приладів направлених на повірку			
	1	2	3	4
Вибіркове (емпіричне) середнє значення $\bar{y}_i(H_j)$	0,0079	0,0309	0,0098	0,0399
Некореговане стандартне відхилення $\sigma_i(H_j)$	0,1111	0,1229	0,1499	0,1501
Максимальне значення функції $\ln[K(W)]$	17,99	14,55	7,5	7,21
Показник розподілу $W$	1,0	1,1	1,1	1,1

Застосовуючи апроксимуючий поліном та відповідно до результатів попередніх обчислень, здійснюємо обчислення коефіцієнтів формуючи систему рівнянь з чотирма невідомими:

$$\begin{cases} y_0 + 12y_1 + 144y_2 + 1728y_3 = 0,0079 \\ y_0 + 24y_1 + 576y_2 + 13824y_3 = 0,0309 \\ y_0 + 36y_1 + 1296y_2 + 46656y_3 = 0,0098 \\ y_0 + 48y_1 + 2304y_2 + 110592y_3 = 0,0399 \end{cases}$$

Шляхом розв'язання наведеної системи рівнянь отримуємо значення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} y_0 &= -0,1545 \\ y_1 &= 0,02198 \\ y_2 &= -0,0008 \\ y_3 &= 9,1617 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Таким чином, на основі отриманих результатів період калібрування вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116 становить 60 місяців, що значно довше, а ніж заявлено у технічній документації до приладу.

**Висновки.** У роботі проведено дослідження методу коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції. Отримані результати підтверджують необхідність коригування періоду калібрування вимірювального обладнання, оскільки отримані значення значно перевищують період перевірки заявлений виробником у технічній документації до приладу (вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116), що є економічно вигідним для підприємства яке використовує дане обладнання у власному виробництві.

Перспективами подальших досліджень є розробка автоматизованої системи визначення періоду калібрування вимірювального обладнання з урахуванням потреб користувача.

### Список літератури

1. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України № 1314-VII від 05.06.2014 року // Відомості Верховної ради, 2014, № 30, ст.1008.
2. Цвіліховський В. І. Критерії вибору методу дослідження / В. І. Цвіліховський, В. А. Томчук. // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України, 2017. № 4. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd\\_2017\\_4\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2017_4_25).
3. Косарева О. Коригування міжкалібрувальних інтервалів вимірювального обладнання / О. Косарева, О.Дзябенко // Метрологія та прилади, 2017. №3. С.33-35.
4. Потоцький І.О. Методи встановлення інтервалів калібрування еталонів та засобів вимірювальної техніки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020. 147 с.
5. Єременко В.С. Метод коригування міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювань / В.С. Єременко, В.М. Мокійчук, О.О. Редько // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017): зб. тез допов. IV міжнар. наук. конф. 31 жовтня – 02 листопада 2017 р., м. Вінниця. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К»», 2017. – С.34-35.
6. Zhang, Ting & Li, Sheng & Liu, Jixin & Xia, Jianchao & He, Chuyao. (2021). Research on the Method of Measuring Equipment Calibration Period Adjustment Based on Reaction Method. 455-459. 10.1109/ICETCI53161.2021.9563464.
7. Gong, Chengcheng & Wang, Wenke & Zhang, Zaiyong & Franssen, Harrie-Jan & Cochand, Fabien & Brunner, Philip. (2021). Influence of calibration period length on predictions of evaporation. 10.5194/egusphere-egu21-8986.
8. Zhang, Xinrui & Wu, Sa & Li, Tao. (2021). Method of Calibration Period Determination for Temperature Chamber Based on Risk Analysis. 1034-1039. 10.3850/978-981-18-2016-8\_187-cd.
9. Moeck, Christian & Freyberg, Jana & Schirmer, Mario. (2017). The effects of model complexity and calibration period on groundwater recharge simulations.
10. Tuenge, Jason & Poplawski, Michael. (2020). Specifying Calibration of Energy-Measuring Equipment. 10.2172/1616176.

11. Sun, Jingxia & Zhang, Aimin & Gong, Guoqiang & Jiang, Jian. (2018). Study on calibration period of Gas Sensor in exercise Pulmonary Function instrument. *Modern Electronic Technology*. 2. 66. 10.26549/met.v2i3.1133.
12. Krndija, Mladjen & Latinović, Marina & Broćeta, Gordana & Savić, Gojko. (2020). Measuring equipment calibration and determination of the initial calibration interval. *CABPEMEHA TEORIJA И ПРАКСА У ГРАДИТЕЉСТВУ*. 14. 10.7251/STP2014411K.
13. Wang, Jing & Zhang, Qi. (2011). Optimization of calibration period for automatic test system based on innovation weibull model. *JOURNAL OF ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENT*. 25. 159-163. 10.3724/SP.J.1187.2011.00159.
14. Kawalec, Małgorzata & Czerwińska, Karolina & Pacana, Andrzej. (2021). Influence of Technical Condition of Control and Measurement Equipment on Calibration Results. *System Safety: Human - Technical Facility - Environment*. 3. 79-88. 10.2478/czoto-2021-0009.
- Myers, Daniel & Ficklin, Darren & Robeson, Scott & Neupane, Ram & Botero-Acosta, Alejandra & Avellaneda, Pedro. (2021). Choosing an arbitrary calibration period for hydrologic models: How much does it influence water balance simulations?. *Hydrological Processes*. 35. 10.1002/hyp.14045.