

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЕМЕНІХІН ВАЛЕРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.317.331

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИК КАЛІБРУВАНЬ ЗАСОБІВ
ВИМІРЮВАННЯ ТА ВІДТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ**

Спеціальність: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Галузь знань: 15 – Автоматизація та приладобудування

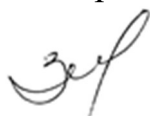
Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



В.С. Семеніхін

Науковий керівник: Захаров Ігор Петрович, доктор технічних наук, професор



Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Семеніхін В.С. Удосконалення методик калібрувань засобів вимірювання та відтворення електричного опору. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2024.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню методик калібрувань засобів вимірювання та відтворення електричного опору шляхом розробки процедур оцінювання невизначеності вимірювань на основі методу ексцесів та загалом підвищенню якості і ефективності результатів калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору, що є важливим науковим і практичним завданням.

Об'єкт дослідження – процес калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору.

Предмет дослідження – методи калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору.

Метою дисертаційної роботи є розробка процедур оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні засобів вимірювання та відтворення електричного опору на основі методу ексцесів.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет, розкрито наукову новизну, практичну значущість одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані стосовно апробації та впровадження в практику результатів дослідження, представлені етапи дослідження, наведено кількість публікацій за темою роботи.

У *першому розділі* проаналізовано існуючі методи калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору, розглянуто класифікацію цих засобів вимірювання та відтворення, наведено основні етапи

калібрування, проаналізовано методи оцінювання невизначеності вимірювань, розглянуто базовий алгоритм GUM та його недоліки, реалізацію методу Монте-Карло для оцінювання невизначеності вимірювань і застосування методу ексцесів для отримання достовірних оцінок невизначеності вимірювань під час калібрувань ЗВТ.

У *другому розділі* представлено розроблені процедури оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні мір електричного опору (далі – МЕО) розроблені на основі методу ексцесів, а саме: процедура оцінювання невизначеності прямих вимірювань значення МЕО, що калібрується за допомогою еталонного омметра; процедура оцінювання невизначеності при звіренні значення МЕО, що калібрується зі значенням еталонної МЕО за допомогою компаратора; процедура оцінювання невизначеності непрямих вимірювань значення МЕО за допомогою потенціометра. Для кожної процедури складено бюджет невизначеності, проведено експериментальне дослідження невизначеності вимірювань, яка оцінювалась при калібрування МЕО на основі методу ексцесів, проведено порівняння отриманих результатів з оцінками розширеної невизначеності, які отримують методом Монте-Карло. Розглянуто валідацію методик калібрування МЕО.

У *третьому розділі* представлено процедури оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні омметрів постійного струму розроблені на основі методу ексцесів, а саме: процедура оцінювання невизначеності прямих вимірювань омметром, що калібрується еталонною МЕО. Розглянуті особливості калібрування аналогових омметрів з нелінійною шкалою, ідентифікація неполіноміальної калібрувальної залежності з урахуванням інструментальних невизначеностей вимірювальних приладів електричного опору, валідація методик калібрувань омметрів постійного струму.

У *четвертому розділі* розглянуто відтворення одиниць електричного опору за допомогою еталона Ома на квантовому ефекті Холла, масштабування одиниці електричного опору у державному первинному еталоні України,

оцінювання відповідності ЗВТ електричного опору метрологічним вимогам за результатами їх калібрування. Запропоновано методику корекції міжкалібрувальних інтервалів ЗВТ електричного опору.

У висновках показано, що вирішена важлива науково-практична задача удосконалення методик калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору шляхом розробки процедур оцінювання невизначеності вимірювань на основі методу ексцесів, підвищення якості і ефективності виконання процесу калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору шляхом врахування особливостей калібрування цих ЗВТ.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше обґрунтована доцільність використання методу ексцесів для отримання оцінок розширеної невизначеності вимірювань під час калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору;

- удосконалені існуючі методики калібрування засобів вимірювання та відтворення значень електричного опору шляхом розробки процедур оцінювання невизначеності вимірювань на основі методу ексцесів;

- вперше розроблена методика ідентифікації неполіноміальних калібрувальних залежностей з урахуванням інструментальних невизначеностей ЗВТ;

- вперше розроблена методика компенсації похибок відліку при калібруванні аналогових омметрів з нелінійною шкалою;

- отримала подальший розвиток методика корегування міжкалібрувального інтервалу ЗВТ за результатами їх перекалібрувань;

- удосконалена методика оцінювання ймовірності відповідності відкаліброваних мір електричного опору та омметрів постійного струму вимогам технічної документації.

Практичне значення отриманих результатів:

- на основі методу ексцесів розроблені бюджети невизначеності вимірювань, які можуть слугувати основою для створення програмних засобів

для автоматизації оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні всіма методами калібрування ЗВТ електричного опору;

- удосконалені процедури валідації методик калібрування мір електричного опору та омметрів постійного струму;

- запропоновано алгоритм порівняння значень розширеної невизначеності, отриманих методом ексцесів з результатами, розрахованими веб-додатком NIST Uncertainty Machine для відсутнього в ньому рівня довіри 0,9545;

- розроблено методики визначення міжкалібрувального інтервалу та оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування ЗВТ в рамках НДДКР 20-04 (державний реєстраційний номер 0121U107763) для ТОВ “Калібрувальна лабораторія “Метрологія”;

- розроблено методики калібрування омметрів та мір електричного опору для калібрувальної лабораторії Приватного підприємства “Науково-виробничий центр оцінки відповідності “Юг”;

- методика ідентифікація неполіноміальної калібрувальної залежності з урахуванням інструментальних невизначеностей ЗВТ впроваджена в навчальний процес на кафедрі ІВТ ХНУРЕ, де вона використовується під час виконання курсової роботи за дисципліною “Основи метрології та вимірювальних технологій”.

Ключові слова: електричний опір, невизначеність, вимірювання, калібрування, бюджет невизначеності, калібрувальні процедури, метод ексцесів, метод, модель, закон розподілу, міжкалібрувальний інтервал, алгоритм.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Zaharov I., Botsiura O., Semenikhin V. Study of reading errors at calibrating analog ohmmeters // Ukrainian Metrological Journal. 2024. No. 1. P. 17–22, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300870> . (Web of Science).

2. Igor Zakharov, Olesia Botsiura, Oleksandr Zakharov, Iryna Zadorozhna, Valerii Semenikhin, Oleg Novoselov. Main stages of calibration of measuring instruments // Ukrainian Metrological Journal. 2023. No. 3. P. 9–15, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291862> . (*Web of Science*).

3. Igor Zakharov, Valerii Semenikhin, Oleksandr Zakharov, Svitlana Shevchenko. Features of measurement uncertainty evaluation during calibration of digital ohmmeters // Ukrainian Metrological Journal. 2023. No. 2. P. 22–27, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2023.286713> . (*Web of Science*).

4. Zakharov I., Neyezhmakov P., Semenikhin V., Warsza Z. Measurement Uncertainty Evaluation of Parameters Describing the Calibrated Curves // USA, Philadelphia, May 23-27, 2022. In book “Advances in Intelligent Systems and Computing”, Vol. 1427, Springer, 2022, pp. 391-398, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-03502-9_38 . (*Web of Science*).

5. Zakharov I., Botsyura O., Semenikhin V. Method of kurtosis in estimating the measurement uncertainty during calibration of the electrical resistance measures using a potentiometer // Ukrainian Metrological Journal, 2021, No 2, 30-34, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2021.236078> . (*Web of Science*).

6. Zakharov I., Botsiura O., Semenikhin V., Fomenko V. Considering of the input quantities distributions in the procedure for measurements uncertainty evaluating on the example of resistance box calibration // Ukrainian Metrological Journal, 2020, No 4, c. 3-8, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2020.224189> . (*Web of Science*).

7. Zaharov I., Botsiura O., Semenikhin V. Measurement uncertainty evaluation by kurtosis method at calibration of electrical resistance standards using a comparator // Ukrainian Metrological Journal. 2020. No. 1. P. 12–16, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2020.204166> . (*Web of Science*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Zakharov I.; Botsiura O.; Zadorozhna I.; Semenikhin V.; Diakov D.; Grokhova G., "Measuring Instruments Calibration: Advanced Realisation of Key

Elements" 2023 XXXIII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6. IEEE, doi: 10.1109/MMA59144.2023.10317918 (*Scopus*).

2. I. Zakharov and V. Semenikhin, "Procedure for Determining the Inter-Calibration Interval of Measuring Instruments," 2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: IEEE. 10.1109/MMA55579.2022.9993188 (*Scopus*).

3. Semenikhin V., Zakharov I. The influence of uncertainty on the choice of the calibration interval of measuring instruments // Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects (UM-2022): Thesis of report XIX International Scientific and Technical Seminar, Sofia, Bulgaria, December 7-8, 2022, pp. 35-36.

4. I. Zakharov, P. Neyezhnikov and V. Semenikhin, "Identification of Non-Polynomial Calibration Dependence Accounting for Instrumental Uncertainties of Measuring Instruments" 2021 13th International Conference on Measurement, Bratislava, Slovakia, 2021, pp. 151-154, doi: 10.23919/Measurement 52780.2021.9446827 (*Scopus*).

5. Захаров И.П., Семенихин В.С., Фоменко В.Д. Корректировка межкалибровочного интервала средства измерений по результатам перекалибровок // Theses of reports XVIII International Scientific and Technical Seminar "Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects", Kharkov, December 13-14, 2021, pp. 27.

6. Захаров И.П. Оценивание неопределенности измерений методом эксцессов при калибровке мер электрического сопротивления с помощью потенциометра / И. П. Захаров, О. А. Боцюра, В. С. Семенихин // Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2021). Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 20-21 травня 2021, Харків, 2021. - С. 32.

7. Семенихин В.С. Процедура оценивания неопределенности измерений при калибровке магазина сопротивления / В.С. Семенихин, В.Д.Фоменко,

научний керівник – професор Захаров І.П. // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті: матеріали 25-го Міжнар. молодіжн. форуму, 20-22 квітня 2021 р. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – Т. 4. – С. 137–138.

8. Анікін В.В., Колбасін О.І., Маслова Н.М., Коробчанська О.І., Семеніхін В.С. Масштабування одиниці електричного опору в державному первинному еталоні України // "Матеріали ХІІ Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" ("МЕТРОЛОГІЯ–2020"). Український метрологічний журнал/Ukrainian Metrological Journal 2А (2020): с. 44.

9. Семеніхін В.С. Аналіз та перспективи діяльності наукового центру електромагнітних вимірювань // "Матеріали ХІІ Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" ("МЕТРОЛОГІЯ–2020"). Український метрологічний журнал/Ukrainian Metrological Journal 2А (2020): с. 50.

10. Семеніхін В.С. Шляхи підвищення продуктивності процесу калібрування цифрових мультиметрів / В. С. Семеніхін // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 24-го Міжнар. молодіж. форуму, 7-9 квіт. 2020р. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – Т. 4. – С. 180-181.

ABSTRACT

Semenikhin V.S. Improving calibration procedures of instruments for electrical resistance measurement and reproduction. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 – Metrology and information-measuring technology. - Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the improvement of calibration procedures of instruments for electrical resistance measurement and reproduction by developing measurement uncertainty evaluation procedures based on the kurtosis method and generally improving the quality and efficiency of the results of calibrating instruments for measuring and reproducing electrical resistance, which is an important scientific and practical task.

The object of research is the process of calibrating instruments for measuring and reproducing electrical resistance.

The subject of research is procedures of calibrating instruments for measuring and reproducing electrical resistance.

The purpose of the dissertation is to develop procedures for the measurement uncertainty evaluation at calibrating instruments for measuring and reproducing electrical resistance based on the kurtosis method.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, formulates the purpose, tasks, object, subject, reveals the scientific novelty, the practical significance of the results obtained, identifies the personal contribution of the applicant, provides data on testing and implementation of the research results into practice, presents the stages of the research, and lists the number of publications on the topic work.

The first section analyzes existing methods for calibrating instruments for measuring and reproducing electrical resistance, considers the classification of these instruments for measuring and reproducing, provides the main stages of calibration,

analyzes methods for measurement uncertainty evaluation, considers the basic GUM algorithm and its shortcomings, the implementation of the Monte Carlo method for measurement uncertainty evaluation and application kurtosis method to obtain reliable estimates of measurement uncertainty in measuring instruments (MI) calibrations.

The second section presents developed procedures for measurement uncertainty evaluation at calibrating electrical resistance measures (hereinafter referred to as ERM) on the basis of the kurtosis method, namely: a procedure for uncertainty evaluation of direct measurements of the value of a ERM to be calibrated using a reference ohmmeter; procedure for uncertainty uncertainty when comparing the value of a ERM to be calibrated with the value of a reference ERM using a comparator; procedure for uncertainty evaluation of indirect measurements of the value of a ERM using a potentiometer. For each procedure, an uncertainty budget was compiled, an experimental study of measurement uncertainty at the calibration of ERM based on the kurtosis method was carried out, and the results obtained were compared with estimates of expanded uncertainty obtained by the Monte Carlo method. Validation of methods for calibrating ERM is considered.

The third section presents procedures for measurement uncertainty evaluation at calibrating DC ohmmeters developed on the basis of the kurtosis method, namely: a procedure for uncertainty evaluation of direct measurements with an ohmmeter to be calibrated by a ERM. The features of calibration of analog ohmmeters whis a nonlinear scale, identification of a non-polynomial calibration dependence taking into account instrumental uncertainties of electrical resistance measuring instruments, validation of calibration methods for DC ohmmeters are considered.

The fourth section discusses the reproduction of units of electrical resistance using the Ohm standard on the quantum Hall effect, the scaling of the unit of electrical resistance in the state primary standard of Ukraine, and the assessment of the compliance of electrical resistance MIs with metrological requirements based on the results of their calibration. A method for correcting the calibration intervals of the electrical resistance MIs is proposed.

The conclusions show that an important scientific and practical problem has been solved to improve the procedures of calibrating instruments for measuring and reproducing electrical resistance by developing procedures for measurement uncertainty evaluation based on the kurtosis method; an increase in the quality and efficiency of the process of calibrating instruments for measuring and reproducing electrical resistance has been achieved by taking into account the probability density function of input quantities in measurement models.

Scientific novelty of the results obtained:

- for the first time, the feasibility of using the kurtosis method to obtain the estimates of expanded measurements uncertainty at calibrating measuring instruments for electrical resistance measurement and reproduction was substantiated;

- improved existing calibrating procedures of instruments for electrical resistance measuring and reproducing by developing procedures for measurement uncertainty evaluation based on the kurtosis method;

- for the first time, a procedure for identifying non-polynomial calibration dependencies has been developed taking into account the instrumental uncertainties of measuring instruments;

- for the first time, a procedure for compensating reading errors when calibrating analog ohmmeters with a nonlinear scale was developed;

- the procedure for adjusting the inter-calibration interval of MIs based on the results of their recalibration was further developed;

- the procedure for the probability of compliance assessing of electrical resistance measures and DC ohmmeters to be calibrated with the requirements of technical documentation has been improved;

Practical significance of the obtained results:

- based on the kurtosis method, measurement uncertainty budgets have been developed, which can serve as the basis for creating software tools for automating the measurement uncertainty evaluation at calibration of electrical resistance MIs by all methods;

- improved procedures for validating calibration procedures for electrical resistance measures and DC ohmmeters;
- an algorithm has been proposed for comparing the values of expanded uncertainty obtained by the kurtosis method with the results calculated by the NIST Uncertainty Machine web application for the confidence level of 0.9545 that is missing from it;
- a procedures for determining the inter-calibration interval and measurement uncertainty evaluation at calibrating MIs has been developed within the framework of research work 20-04 (national registration number 0121U107763) for the limited liability company “Calibration Laboratory “Metrology”;
- the methods of calibrating ohmmeters and measures of electrical resistance were developed for the calibration laboratory of the Private Enterprise "Scientific and Production Center for Conformity Assessment "Yug";
- the procedure for identifying a non-polynomial calibration relationship taking into account the instrumental uncertainties of the MIs has been introduced into the educational process at the Department of Information and Measurement Technology KhNURE, where it is used in coursework in the discipline “Fundamentals of metrology and measurement technologies”.

Key words: electrical resistance, uncertainty, measurement, calibration, uncertainty budget, calibration procedures, kurtosis method, method, model, distribution law, calibration interval, algorithm.

List of publications of the acquirer

Scientific works in which the main scientific results were published:

1. Zaharov I., Botsiura O., Semenikhin V. Study of reading errors at calibrating analog ohmmeters // Ukrainian Metrological Journal. 2024. No. 1. P. 17–22, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300870> . (*Web of Science*).
2. Igor Zakharov, Olesia Botsiura, Oleksandr Zakharov, Iryna Zadorozhna, Valerii Semenikhin, Oleg Novoselov. Main stages of calibration of measuring

instruments // Ukrainian Metrological Journal. 2023. No. 3. P. 9–15, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291862> . (*Web of Science*).

3. Igor Zakharov, Valerii Semenikhin, Oleksandr Zakharov, Svitlana Shevchenko. Features of measurement uncertainty evaluation during calibration of digital ohmmeters // Ukrainian Metrological Journal. 2023. No. 2. P. 22–27, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2023.286713> . (*Web of Science*).

4. Zakharov I., Neyezhmakov P., Semenikhin V., Warsza Z. Measurement Uncertainty Evaluation of Parameters Describing the Calibrated Curves // USA, Philadelphia, May 23-27, 2022. In book “Advances in Intelligent Systems and Computing”, Vol. 1427, Springer, 2022, pp. 391-398, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-03502-9_38 . (*Web of Science*).

5. Zakharov I., Botsyura O., Semenikhin V. Method of kurtosis in estimating the measurement uncertainty during calibration of the electrical resistance measures using a potentiometer // Ukrainian Metrological Journal, 2021, No 2, 30-34, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2021.236078> . (*Web of Science*).

6. Zakharov I., Botsiura O., Semenikhin V., Fomenko V. Considering of the input quantities distributions in the procedure for measurements uncertainty evaluating on the example of resistance box calibration // Ukrainian Metrological Journal, 2020, No 4, c. 3-8, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2020.224189> . (*Web of Science*).

7. Zaharov I., Botsiura O., Semenikhin V. Measurement uncertainty evaluation by kurtosis method at calibration of electrical resistance standards using a comparator // Ukrainian Metrological Journal. 2020. No. 1. P. 12–16, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2020.204166> . (*Web of Science*).

Published and materials of conferences (Approbation):

1. Zakharov I.; Botsiura O.; Zadorozhna I.; Semenikhin V.; Diakov D.; Grokhova G., "Measuring Instruments Calibration: Advanced Realisation of Key Elements" 2023 XXXIII International Scientific Symposium Metrology and

Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6. IEEE, doi: 10.1109/MMA59144.2023.10317918 (*Scopus*).

2. I. Zakharov and V. Semenikhin, "Procedure for Determining the Inter-Calibration Interval of Measuring Instruments," 2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-4. IEEE, doi: IEEE. 10.1109/MMA55579.2022.9993188 (*Scopus*).

3. Semenikhin V., Zakharov I. The influence of uncertainty on the choice of the calibration interval of measuring instruments // Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects (UM-2022): Thesis of report XIX International Scientific and Technical Seminar, Sofia, Bulgaria, December 7-8, 2022, pp. 35-36.

4. I. Zakharov, P. Neyezhnikov and V. Semenikhin, "Identification of Non-Polynomial Calibration Dependence Accounting for Instrumental Uncertainties of Measuring Instruments" 2021 13th International Conference on Measurement, Bratislava, Slovakia, 2021, pp. 151-154, doi: 10.23919/Measurement 52780.2021.9446827 (*Scopus*).

5. Zakharov I.P., Semenikhin V.S., Fomenko V.D. Adjustment of the calibration interval of a measuring instrument based on the results of recalibrations// Theses of reports XVIII International Scientific and Technical Seminar "Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects", Kharkov, December 13-14, 2021, pp. 27.

6. Zakharov I. P. Estimation of measurement uncertainty using the kurtosis method when calibrating electrical resistance measures using a potentiometer / I. P. Zakharov, O. A. Botsyura, V. S. Semenikhin // Metrology, information and measurement technologies and systems (MIVTS-2021). Abstracts of reports of the VIII International Scientific and Technical Conference, May 20-21, 2021, Kharkiv, 2021. - P. 32.

7. Semenikhin V.S. Procedure for estimating measurement uncertainty when calibrating a resistance magazine / V.S. Semenikhin, V.D. Fomenko, scientific supervisor - Professor Zakharov I.P. // Radio electronics and youth in the 21st

century: materials of the 25th International youth of the forum, April 20-22, 2021 - Kharkiv: Khnure, 2021. - Volume 4. - Pages 137-138.

8. Anikin V.V., Kolbasin O.I., Maslova N.M., Korobchanska O.I., Semenikhin V.S. Scaling of the unit of electrical resistance in the state primary standard of Ukraine // "Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference "Metrology and measuring technique" ("METROLOGY-2020")." Ukrainian Metrological Journal 2A (2020), p. 44.

9. Semenikhin V.S. Analysis and prospects of the scientific center of electromagnetic measurements // "Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference "Metrology and measuring technique" ("METROLOGY-2020"). Ukrainian Metrological Journal 2A (2020), p. 50.

10. Semenikhin V.S. Ways to increase the productivity of the calibration process of digital multimeters / V.S. Semenikhin // Radio electronics and youth in the 21st century: materials of the 24th International. youth forum, April 7-9 2020 - Kharkiv: Khnure, 2020. - Vol. 4. - P. 180-181.

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ТА ВІДТВОРЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ	27
1.1 Класифікація засобів вимірювання та відтворення значень електричного опору	27
1.2 Основні етапи калібрування ЗВТ	39
1.2.1 Підготовка для калібрування	40
1.2.2. Вимірювальний експеримент	44
1.2.3. Обробка експериментальних даних	45
1.2.4 Оформлення підсумків калібрування	47
1.2.5. Використання результатів калібрування на практиці	48
1.3 Класифікація існуючих методів калібрування засобів вимірювання та відтворювання значень електричного опору	49
1.3.1. Прямі методи вимірювання опорів	49
1.3.2. Непрямі методи вимірювання опорів	50
1.3.3. Мостовий метод вимірювань опорів	52
1.3.4. Метод заміщення	55
1.4 Аналіз методів оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні ЗВТ	56
1.4.1 Базовий алгоритм GUM та його недоліки	56
1.4.2 Реалізація методу Монте-Карло для оцінювання невизначеності вимірювань	63
1.4.3 Застосування методу ексцесів для отримання достовірних оцінок невизначеності вимірювань під час калібрувань ЗВТ	69
Висновки до розділу 1	71

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОЦЕДУР ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ МІР ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ	72
2.1 Процедура оцінювання невизначеності прямих вимірювань значення міри опору, що калібрується за допомогою еталонного омметра	72
2.2 Процедура оцінювання невизначеності при звіренні значення міри опору, що калібрується зі значенням еталонної міри опору за допомогою компаратора	77
2.3 Процедура оцінювання невизначеності непрямих вимірювань значення міри електричного опору за допомогою потенціометра	83
Висновки до розділу 2	88
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОЦЕДУР ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ОММЕТРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	90
3.1 Процедура оцінювання невизначеності прямих вимірювань омметром, що калібрується, еталонної міри електричного опору	90
3.2 Особливості калібрування аналогових омметрів з нелінійною шкалою	98
3.2.1 Оцінювання невизначеності вимірювань при калібрування аналогового омметра з нелінійною шкалою у фіксованій точці	98
3.2.2 Ідентифікація неполіноміальної калібрувальної залежності з урахуванням інструментальних невизначеностей вимірювальних приладів електричного опору	106
Висновки до розділу 3	110
РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ	112
4.1 Відтворення одиниць електричного опору за допомогою еталона Ома на квантовому ефекті Холла	112
4.1.1 Апаратурне рішення еталона	115
4.1.2 Міра електричного опору на КЕХ	117

4.2 Масштабування одиниці електричного опору у державному первинному еталоні України	121
4.2.1 Система масштабування і передавання	123
4.2.2 Набір еталонних мір	131
4.3 Оцінювання відповідності ЗВТ електричного опору метрологічним вимогам за результатами їх калібрування	143
4.4 Корекція міжкалібрувальних інтервалів ЗВТ електричного опору	144
4.5 Валідація (верифікація) методик калібрувань	151
Висновки до розділу 4	154
ВИСНОВКИ	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	157
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	167
ДОДАТОК Б. Довідки впровадження результатів дисертації	172

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ВП – вимірювальний пристрій;
ВС – вимірювальна система;
КЛ – калібрувальна лабораторія;
МЕО – міра електричного опору;
МК – методика калібрування;
МКІ – міжкалібрувальний інтервал;
ММ – матеріальна міра;
НД – нормативна документація;
НВ – невизначеності вимірювань;
СКВ – середньоквадратичне відхилення;
ЗВТ – засіб вимірювальної техніки;
ПП – пристрій порівняння;
КЕХ – квантовий ефект Холла;
КХО – квантовий холлівський опір;
КСВ – кількість ступенів свободи;
ЕЧСС – ефективне число ступенів свободи;
GUM – Настанова з подання невизначеності вимірювань;
ISO – Міжнародна організація зі стандартизації;
IEC – Міжнародна електротехнічна комісія;
JCGM – Об'єднаний комітет із керівництва у метрології
MPE – максимально допустима похибка;
SI – Міжнародна система одиниць;
VIM – Міжнародний словник із метрології;
A, *B* – статистичний та нестатистичний методи оцінювання невизначеності вимірювань;
d – дискретність відліку ВП;
f – модель вимірювання;
k – коефіцієнт охоплення;

L – число калібрувань, що пройшли до момента часу, що розглядається;

n – число проведених багаторазових вимірювань у точці;

η – значення ексцесу вимірюваної величини;

$t_{0,95}(\nu)$ – коефіцієнт Стьюдента для ймовірності 0,95 та числа степенів свободи ν ;

p – рівень довіри;

U, u – розширена та стандартна невизначеності;

u_A, u_B – стандартні невизначеності, що оцінені за типом A та B , відповідно;

$u_c(y)$ – сумарна стандартна невизначеність вимірювань;

X_c, x_c – величина, що вимірюється (відтворюється) калібрувальним ЗВТ та її значення;

X_s, x_s – величина, що вимірюється (відтворюється) еталонним ЗВТ та її значення;

X_0, x_0 – вихідна величина компаратора та її значення;

Δ – систематична похибка каліброваного ЗВТ;

Δ_s – додаткова похибка еталонного ЗВТ;

Δ_c – похибка відліку (квантування) каліброваного ЗВТ;

Δ_0 – додаткова похибка компаратора;

Δ_{III} – похибка нееквівалентності пристрою порівняння;

θ_s, θ_{cc} – границі складової додаткової похибки еталонного ЗВТ та засоби порівняння;

ν, ν_{eff} – число ступенів свободи та ефективне число степенів свободи відповідно.

ВСТУП

Інтеграція України в міжнародне співтовариство передбачає визнання результатів вимірювань, проведених випробувальними і калібрувальними лабораторіями. Однією з умов такого визнання є наявність процедур оцінювання невизначеності вимірювань.

Актуальність теми. Електричні вимірювання на даний час є одним з найбільш поширених видів вимірювань. Виконання робіт в області електричних вимірювань передбачає не тільки розробку ефективних методів вимірювання та способів обробки вимірювальної інформації, а також і дослідження питань простежуваності результатів вимірювання до електричних одиниць SI та оцінювання характеристик їх точності. Однією з найважливіших областей електричних вимірювань є область вимірювання електричного опору.

Незважаючи на наявність великої кількості методик калібрування засобів вимірювальної техніки електричного опору в багатьох з них відсутні процедури оцінювання невизначеності вимірювань, які в цій області мають свої специфічні особливості.

У зв'язку з цим тема дисертаційного дослідження “Удосконалення методик калібрувань засобів вимірювання і відтворення електричного опору” є актуальною, а її вирішення – доцільним і своєчасним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі “Інформаційно-вимірювальних технологій” ХНУРЕ у рамках НДДКР 20-04 (державний реєстраційний номер 0121U107763) “Розробка процедур системи управління калібрувальної лабораторії” для ТОВ “Калібрувальна лабораторія “Метрологія” в якій здобувач був відповідальним виконавцем.

Об'єкт дослідження: Процес калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору.

Предмет дослідження: Методи калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору.

Метою дослідження є розробка процедур оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні засобів вимірювання та відтворення електричного опору на основі методу ексцесів.

Задачі. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі передбачається виконання наступних задач:

- проаналізувати існуючі засоби вимірювання та відтворення електричного опору та методи їх калібрування;
- розробити процедури оцінювання невизначеності вимірювань для існуючих методів калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору на основі методу ексцесу;
- експериментально та за допомогою численного моделювання перевірити розроблені процедури оцінювання невизначеності вимірювань.

Методи дослідження. В основу роботи покладені теоретичні методи досліджень, що ґрунтуються на основах теорії ймовірності та математичної статистики – для удосконалення існуючих методів опрацювання результатів та оцінювання невизначеності вимірювань; теорії вимірювань – для розробки прикладних аспектів оцінювання невизначеності вимірювань при виконанні метрологічних робіт; методи статистичного моделювання – для перевірки достовірності розроблених положень.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше обґрунтована доцільність використання методу ексцесів для отримання оцінок розширеної невизначеності вимірювань під час калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору;
- удосконалені існуючі методики калібрування засобів вимірювання та відтворення значень електричного опору шляхом розробки процедур оцінювання невизначеності вимірювань на основі методу ексцесів;
- вперше розроблена методика ідентифікації неполіноміальних калібрувальних залежностей з урахуванням інструментальних

невизначеностей ЗВТ;

- вперше розроблена методика компенсації похибок відліку при калібруванні аналогових омметрів з нелінійною шкалою;
- отримала подальший розвиток методика корегування міжкалібрувального інтервалу ЗВТ за результатами їх перекалібрувань;
- удосконалена методика оцінювання ймовірності відповідності відкаліброваних мір електричного опору та омметрів постійного струму вимогам технічної документації.

Практичне значення отриманих результатів:

- на основі методу ексцесів розроблені бюджети невизначеності вимірювань, які можуть слугувати основою для створення програмних засобів для автоматизації оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні всіма методами калібрування ЗВТ електричного опору;
- удосконалені процедури валідації методик калібрування мір електричного опору та омметрів постійного струму;
- запропоновано алгоритм порівняння значень розширеної невизначеності, отриманих методом ексцесів з результатами, розрахованими веб-додатком NIST Uncertainty Machine для відсутнього в ньому рівня довіри 0,9545;
- розроблено методики визначення міжкалібрувального інтервалу та оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування ЗВТ в рамках НДДКР 20-04 (державний реєстраційний номер 0121U107763) для ТОВ “Калібрувальна лабораторія “Метрологія”;
- розроблено методики калібрування омметрів та мір електричного опору для калібрувальної лабораторії Приватного підприємства “Науково-виробничий центр оцінки відповідності “Юг”;
- методика ідентифікація неполіноміальної калібрувальної залежності з урахуванням інструментальних невизначеностей ЗВТ впроваджена в навчальний процес на кафедрі ІВТ ХНУРЕ, де вона використовується під час

виконання курсової роботи за дисципліною “Основи метрології та вимірювальних технологій”.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є закінченим, самостійно виконаним науковим дослідженням. Автором виконано весь комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з удосконаленням методик калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору.

Внесок автора у наукові праці виконані у співавторстві:

– [1] досліджено особливості калібрування омметрів з нелінійною шкалою, отримано вирази для оцінювання невизначеності поправок на всі складові похибки відліку для лінійної і нелінійної шкал омметра, розроблено алгоритм оцінювання числового значення вимірюваного опору за нелінійною шкалою омметра;

– [2] описано основні етапи калібрування ЗВТ, подано зміст вимірювального експерименту з наведенням основних методів вимірювання, які можна використовувати при калібруванні засобів вимірювання та матеріальних мір;

– [3] уточнено модель вимірювань; складено бюджет невизначеності, що включає ексцеси вхідних та вимірюваної величин; проведено оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні цифрового омметра типу 2318; розроблено алгоритм визначення розширеної невизначеності веб-додатком NIST Uncertainty Machine для відсутнього рівня довіри 0,9545;

– [4] розроблено рішення оцінки невизначеності параметрів, визначених для неполіноміальної залежності, з урахуванням інструментальних невизначеностей для вимірюваних значень;

– [5] проаналізовано існуючі методи вимірювань при калібруванні мір електричного опору; розраховано зміщення оцінок вимірюваної величини і сумарної стандартної невизначеності, обумовлені нелінійністю моделі вимірювань; проведено оцінювання невизначеності вимірювань під час

калібрування однозначної міри електричного опору Р331; виявлено домінуючі внески невизначеностей;

– [6] розроблено метод ексцесів і закону поширення розширеної невизначеності для застосування у процедурі оцінювання невизначеності вимірювань, записано модель прямого вимірювання значення опору міри опору за допомогою зразкового омметра, описані процедури оцінювання невизначеності вимірювань, наводяться бюджети невизначеності для кожного із методів; проведено експеримент з оцінювання невизначеності цими методами при калібрування магазину опору Р33;

– [7] проаналізовано модель передачі розміру одиниці опору при калібруванні мір електричного опору за допомогою компаратора; описано процедуру оцінювання розширеної невизначеності вимірювань на основі методу ексцесів, складено бюджет невизначеності; проведено експеримент, оцінено значення опору міри електричного опору Р321, що калібрувалась, сумарна стандартна та розширена невизначеності, коефіцієнт охоплення для рівня довіри 0,9545.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорювались на: XXXIII, XXXII Міжнародному науковому симпозіумі “International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)” (Созопол, Болгарія, 2023, 2022) [8,9], XIX Міжнародному науковому і технічному семінарі “Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects” (Софія, Болгарія, 2022) [10], XVIII Міжнародному науковому і технічному семінарі “Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects” (Харків, 2021) [11], 13-й Міжнародній конференції з вимірювань “2021 13th International Conference on Measurement” (Братіслава, Словачія, 2021) [12], VIII Міжнародній науково-технічній конференції “Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2021)” (Харків, 2021) [13], 25-му і 24-му Міжнародному молодіжному форуму “Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті” (Харків, 2021, 2020) [14,15], XII Міжнародній науково-технічній конференції

“Метрологія та вимірювальна техніка” (“МЕТРОЛОГІЯ–2020”), (Харків, 2020) [16, 17].

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 друкованих праць, у тому числі: 7 статей – у наукових періодичних фахових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection, 10 – у матеріалах апробаційного характеру (3 проіндексовані у базах даних Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 174 сторінки, включаючи 43 рисунка за текстом; 38 таблиць за текстом; 2 додатки на 8 сторінках; 102 найменування використаних джерел інформації на 11 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ТА ВІДТВОРЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

1.1 Класифікація засобів вимірювання та відтворення значень електричного опору

Будь-які вимірювання фізичних величин виконуються певним методом, який реалізується у відповідному засобі вимірювальної техніки (ЗВТ).

ЗВТ – це узагальнене поняття конструктивно закінчених пристроїв, які мають одну із трьох ознак:

- 1) виробляють сигнал, який несе інформацію про розмір (значення) вимірюваної фізичної величини (ФВ), наприклад, покази омметра;
- 2) відтворюють ФВ заданого розміру;
- 3) мають нормовані метрологічні характеристики (НМХ).

Отже, ЗВТ – це технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики [18].

До ЗВТ відносяться (згідно з ДСТУ 2681-94 [19]):

- 1) Засоби вимірювань (ЗВ).
- 2) Вимірювальні пристрої.

Класифікація ЗВТ наведено на рис.1.1

Засіб вимірювань – засіб вимірювальної техніки, який реалізує повну процедуру вимірювань. Вимірювана ФВ у ЗВ перетворюється на відповідний сигнал вимірювальної інформації, який спостерігач сприймає або безпосередньо на шкалі ЗВ, або який, після перетворення та обробки, передається через канали зв'язку на інші ЗВТ у вигляді сигналу зовсім іншої ФВ.

Відповідно до цього будь-який ЗВ можна уявити у вигляді ланцюга, тої чи іншої структури, який складається з ряду функціональних елементів (перетворювачів), об'єднаних у єдиний схемно-конструктивний пристрій.



Рисунок 1.1 – Класифікація засобів вимірювальної техніки

Аналіз літератури показав – до засобів вимірювань відносяться [20-38]:

- а) вимірювальні прилади;
- б) реєструвальні засоби вимірювань;
- в) вимірювальні канали;
- г) вимірювальні установки;
- д) вимірювальні системи;
- е) кодові засоби вимірювань (аналого-цифрові перетворювачі).

Засіб вимірювань реалізує в ідеальному випадку лінійну залежність між значеннями вимірюваної величини та її відповідними розмірами.

а) Вимірювальний прилад (ВП) – це засіб вимірювання, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем завдяки наявності відлікового пристрою (шкала з вказівником, цифрове табло).

За формою видачі інформації (способу відліку інформації) прилади поділяються на:

- аналогові, покази яких є неперервною функцією вимірюваної величин;
- цифрові, покази яких дискретні, а інформація подається у цифровій

формі;

– реєструвальні.

б) Реєструючий засіб вимірювання – засіб вимірювання для вимірювання й автоматичного запису значень вимірюваних величин, які можуть змінюватись у часі.

Прилади бувають показуючі, самописні, сигнальні, регульовальні з лічильниками, з нормувальними перетворювачами та іншими додатковими функціональними засобами.

в) Вимірювальний канал – сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших технічних засобів, призначена для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану фізичну величину (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Структурна схема вимірювального каналу

г) Вимірювальна установка (ВУ) - сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювальної техніки та допоміжних технічних засобів (стабілізуючих, перемикаючих, регулюючих), розміщених в одному місці і призначених для вимірювань однієї або декількох фізичних величин та для формування сигналів вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприймання спостерігачем.

д) Вимірювальна система (ВС) – це сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування та інших технічних засобів, розміщених в різних точках досліджуваного простору (середовища, об'єкта тощо) з метою вимірювання однієї або декількох фізичних величин, властивих цьому простору, та формування (створення) сигналів вимірювальної інформації про вимірювані фізичні величини у формі, доступній для автоматичного опрацювання, зберігання,

передачі й використання в автоматичних системах управління.

е) Аналого-цифровий перетворювач (кодовий засіб вимірювання) – засіб вимірювання, у якому створюється кодовий сигнал вимірювальної інформації.

Найбільш поширеним засобом вимірювання електричного опору є омметр.

Омметр є приладом для вимірювання опорів методом безпосереднього відліку.

Омметри використовують для прямого вимірювання електричного струму і розділяють на дві групи: 1) омметри з вимірювальним механізмом, що має одну рухома рамку з пружинками для створення протидіючого моменту (однорамкові омметри); 2) омметри з логометром, рухома частина яких складається з двох рамок.

У більшості аналогових омметрів застосовується магнітоелектричний вимірювальний механізм [39].

Поділ омметрів на дві групи характеризує не тільки конструктивні особливості їх вимірювальних механізмів, але і визначає їх основні властивості. Однорамкові омметри характеризуються тим, що їхні покази правильні тільки при визначеному значенні напруги джерела струму і при визначеному значенні струму, який проходить через вимірюваний опір. З цієї причини майже всі однорамкові омметри мають те чи інше приладдя для контролю значень напруги і струму. Покази омметрів з логометром не залежать від напруги джерела струму. Однорамкові омметри виготовляються за однією із двох схем: з послідовним або паралельним з'єднанням струму з вимірювальним опором (рис. 1.3) R_X .

У схемах, які зображені на рис.1.3 *а, б* ВМ – магнітоелектричний вимірювальний механізм. При незмінному значенні напруги живлення $U = \text{const}$ покази вимірювального механізму залежать тільки від значення опору R_X , що вимірюється. Відповідно шкала приладу (ВМ) може бути проградуїрована в одиницях опору.

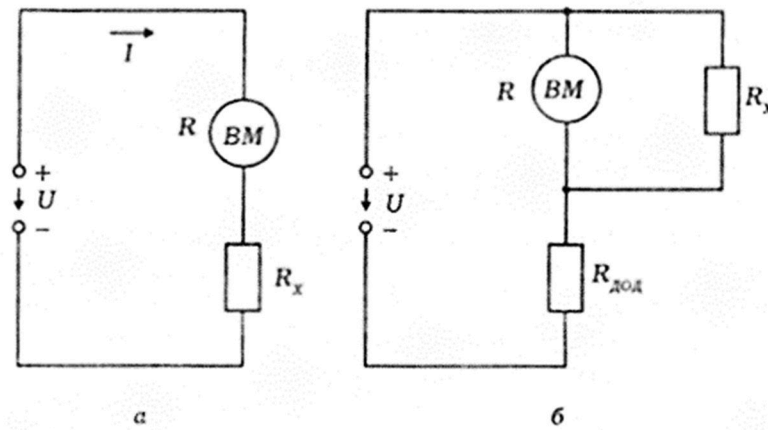


Рисунок 1.3 – Схема включення омметрів [39]

Для послідовної схеми включення елемента з опором R_x (рис.1.3, а) кут відхилення стрілки визначається за формулою:

$$\alpha = sU \frac{1}{R + R_x}. \quad (1.1)$$

Для паралельної схеми включення (рис.1.3, б) кут відхилення стрілки визначається за формулою:

$$\alpha = sU \frac{R_x}{R \cdot R_x + R_{\text{доп}}(R + R_x)}, \quad (1.2)$$

де s – чутливість магнітоелектричного вимірювального механізму; R – опір вимірювального механізму; $R_{\text{доп}}$ – опір додаткового резистора. Оскільки значення всіх величин у правій частині формул (1.1) і (1.2), окрім R_x , постійні, то кут відхилення визначається значенням R_x .

З формул (1.1) і (1.2) витікає, що шкали омметрів для обох схем вмикання є нерівномірні. В послідовній схемі вмикання, на відміну від паралельної, нуль шкали співпадає з максимальним кутом повороту рухомої частини. Омметри з послідовною схемою вмикання більш придатні для вимірювання великих опорів, а з паралельною схемою – малих. Джерелом живлення U є батарея. Необхідність встановлення нуля за допомогою коректора є найбільшим недоліком однорамкових омметрів. Цей недолік відсутній у омметрів з магнітоелектричним логометром.

Схема вмикання логометра в омметрі показана на рис. 1.4.

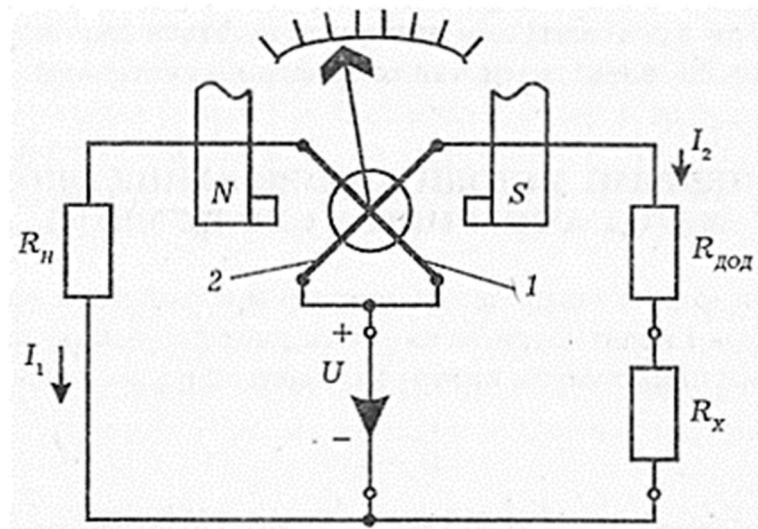


Рисунок 1.4 – Схема вмикання логометра в омметрі [39]

У цій схемі 1 і 2 – котушки логометра (їх опори R_1 і R_2); R_H і $R_{\text{доп}}$ – додаткові резистори постійно включені в схему. Оскільки

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_H}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2 + R_{\text{доп}} + R_X},$$

а також враховуючи, що кут відхилення стрілки логометра α пропорційний відношенню струмів в котушках

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \text{ то } \alpha = f\left(\frac{R_2 + R_{\text{доп}} + R_X}{R_1 + R_H}\right), \quad (1.3)$$

тобто кут відхилення стрілки приладу визначається значенням R_X (опору, що вимірюється) і не залежить від напруги U .

Омметри з логометром мають різні конструкції, залежно від необхідної межі вимірювання і призначення (щитові і переносні прилади) і т.д.

Вимірювальний пристрій – це засіб вимірювальної техніки, в якому виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань (вимірювальна операція). Він має відокремлену конструкцію і самостійне призначення.

До вимірювальних пристроїв відносяться:

- а) міри (фізичних величин);
- б) компаратори;
- в) вимірювальні перетворювачі;



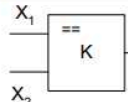
г) масштабні перетворювачі;

д) числові вимірювальні перетворювачі (обчислювальні компоненти).

Вимірювальні пристрої не забезпечують можливості здійснювати відлік інформації.

Таблиця 1.1

Характеристики вимірювальних пристроїв [18]

Вимірювальні пристрої	Вимірювальні операції	Умовне позначення	Рівняння перетворення
Міра	Відтворення фізичних величин		$X_N = N_X * q_X$
Вимірювальний перетворювач	Вимірювальне перетворення		$Y = F(X)$ $Y = K_{ВП} * X$
Масштабний перетворювач	Масштабне перетворення		$X_1 = K_{МП} * X$
Компаратор (пристрій порівняння)	Порівняння		$\Delta X = \text{sign}(X_1 - X_2)$

Міра фізичної величини (або міра) – вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) зберігання фізичної величини заданого значення.

Міра виготовляється у вигляді тіла або устрою і призначена для відтворення та зберігання фізичної величини заданого розміру, значення якого відомо з необхідною для вимірювань точністю.

Розрізняють:

а) однозначні міри;

б) багатозначні міри;

в) набір мір – спеціально підібраний комплект конструктивно відокремлених мір, які можуть використовуватися не тільки окремо, але й в різних комбінаціях для відтворення ряду розмірів даної ФВ.

г) магазини мір – це набір мір, конструктивно об'єднаних в одне ціле з

пристроєм для вмикання їх у різних комбінаціях.

За кількістю вихідних каналів міри поділяються на однозначні та багатозначні, а за регульованістю вихідної величини на: регульовані та нерегульовані.



Рисунок 1.5 – Класифікація мір фізичних величин [18]

Компаратор – вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних фізичних величин.

Порівняння – вимірювальна операція, що полягає у відображенні співвідношення між розмірами двох однорідних фізичних величин відповідним висновком: більша, менша чи однакова за розміром.

Компараторами електричного опору є одинарні та подвійні мости постійного та змінного струму.

Вимірювальний перетворювач – засіб вимірювання, який має нормовані метрологічні характеристики та призначений для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або сигнал вимірювальної інформації, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень та передачі на відстань, але не для безпосереднього спостереження за вимірюваною величиною.

Вимірювальне перетворення фізичної величини – вимірювальна операція, при якій вхідна фізична величина перетворюється у вихідну, що функціонально з нею пов'язана.



Рисунок 1.6 – Класифікація вимірювальних перетворювачів

Масштабний перетворювач – вимірювальний перетворювач, який реалізує масштабне вимірювальне перетворення.

Масштабне перетворення – лінійне вимірювальне перетворення вхідної величини без зміни її роду. В результаті масштабного перетворення вхідна величина перетворюється в однорідну вихідну, розмір якої пропорційний в k разів розмірові вхідної.

Числовий вимірювальний перетворювач (ЧВП) – вимірювальний пристрій, який є сукупністю засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції під час вимірювань.

Числове вимірювальне перетворення – операція обчислення проміжних результатів вимірювань з метою отримання остаточного результату.

Найбільш поширеними пристроями відтворення та зберігання одиниці електричного опору є міри електричного опору.

Мірами електричного опору є: однозначні міри опору (вимірювальні котушки опору), багатозначні міри опору (магазини опорів), перехідні міри, кодо-керовані міри.

Схематично конструкцію вимірювальної котушки можна показати як на рис. 1.7. Резистивний елемент може бути у вигляді обмотки, намотаної на каркас із ізоляційного матеріалу (якщо опір великий), пластини, спіралі або петлі (якщо опір малий). Високоомні котушки (опір понад 10^6 Ом) виготовляються з мікродроту (манганіновий дріт діаметром від декількох до декількох десятків мікрон, вкритий скляною ізоляцією), а низькоомні – переважно на базі традиційних друкованих резисторів. Виводи резистивного елемента під'єднано до струмовідводів, змонтованих на ізоляційні панелі, на якій розміщено струмові 1 та потенціальні 2 затискачі. Вся конструкція закріплюється у металевому циліндричному корпусі, який виконує роль тепловирівнювача.

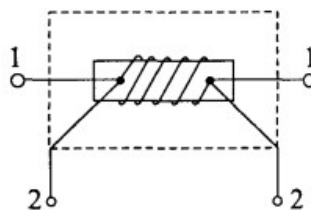


Рисунок 1.7 – Схема вимірювальної котушки опору

Номінальні значення вимірювальних котушок електричного опору (ВКО) дорівнюють $1 \cdot 10^n$, де n – ціле число від -4 до +16, а клас точності від 0,0002 до 0,2.

Допустиме відхилення дійсного значення опору ВКО від його номінального значення для мір високого класу точності (від 0,0002 до 0,01) не повинно перевищувати 0,01 %, а для мір класів точності від 0,02 до 0,2 – числового значення класу точності у відсотках.

Попри високу температурну стабільність опорів ВКО для мір високого класу точності відхилення температури від номінального значення може призвести до появи додаткової (температурної) похибки. Додаткова температурна похибка в межах робочого діапазону температур (поза межами нормального діапазону температур) не повинна перевищувати числового значення класу точності у відсотках.

Значення опору R_t для ВКО високого класу точності при температурі в межах робочого діапазону температур визначається за формулою:

$$R_t = R_{20} + R_{\text{ном}} \left[\alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \right], \quad (1.4)$$

де R_{20} – дійсне значення опору при температурі 20 °С; $R_{\text{ном}}$ – номінальне значення опору, Ом; $\alpha = (3 \dots 40) \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ і $\beta = -(3 \dots 8) \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}^2$ – температурні коефіцієнти (вказуються в експлуатаційній документації на ВКО).

Допустима зміна опору ВКО за 1 рік (річна нестабільність) не повинна перевищувати числового значення класу точності у відсотках.

Допустиме навантаження для ВКО характеризується значенням номінальної та максимальної потужностей. Для мір з опором до 10^5 Ом включно нормується номінальна потужність, значення якої зазвичай не перевищує 0,1 Вт, а для мір з опором понад 10^6 Ом – номінальна напруга (100...1000) В. В межах номінальної потужності похибка міри не виходить за межі допустимого значення для даного класу точності. При відхиленні значень потужності від номінального до максимального допускається поява додаткової похибки, значення якої не повинно перевищувати класу точності.

Повний опір Z міри на змінному струмі можна записати у вигляді:

$$Z = R_{\text{ном}} (1 + j\omega\tau), \quad (1.5)$$

де $\tau = \frac{L}{R} - RC$ – стала часу, значення якої для сучасних однозначних мір опору становить $5 \cdot 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ с.

Стала часу τ ВКО як і, відповідно, верхня межа частотного діапазону (зазвичай від 50 Гц до 100 кГц) вказується в технічній документації на ВКО.

Окрім однозначних використовуються багатозначні міри опору – *магазини опору (МО)*. Їх основними технічними та метрологічними характеристиками є максимальне значення опору, кількість декад, мінімальний опір однієї ступені наймолодшої декади (дискретність ΔR), клас точності. Допустима річна нестабільність опорів у відсотках від номінального значення МО класів точності 0,0005...0,01 визначається

$$\delta_H = \pm \left[c + d \left(\frac{R_{\max}}{R} - 1 \right) \right],$$

а межа допустимого відхилення дійсного значення опору у відсотках від номінального як

$$\delta = \pm \left[b + d \left(\frac{R_{\max}}{R} - 1 \right) \right],$$

де R_{\max} – максимальне значення опору магазину; R – номінальне значення увімкненого опору; $b = 0,01$ для МО класів точності 0,0005...0,01 і $b = c$ для решти класів точності.

Одним з технічних параметрів магазину є початковий опір R_{Π} – опір між затискачами магазину при встановленні всіх перемикачів на нульові покази.

Для магазинів опору з номінальним значенням опору резистора не більшим за 10^5 Ом вказується номінальна потужність одного ступеня (зазвичай це 0,1 Вт), а для магазинів з опором резисторів понад 10^5 Ом нормується номінальна напруга ступені, яка, зазвичай, не перевищує 3 кВ.

В магазинах, призначених для використання на змінному струмі, встановлюється верхнє граничне значення частоти або нормується значення сталого часу τ залежно від увімкненого опору та номінальної потужності одного ступеня.

Перехідні міри використовують при точних вимірюваннях опорів резисторів, номінальні значення яких не є кратним 10^n Ом (n – ціле число). Вони містять секції по 11 резисторів із значенням опору $R_m = 10^n$ Ом. Конструктивно забезпечена можливість вимірювань опору кожного з резисторів методом заміщення із однозначною мірою опору 10^n Ом, а потім,

вмикаючи різну кількість резисторів, отримують будь-який опір в межах $(1 \dots 11) \cdot 10^n$ Ом і використовують його як зразковий. Існують також міри, в яких окремі секції можуть вмикатись послідовно-паралельно. Це дає можливість отримати опори, значення яких будуть в границях $(0,1 \dots 11) \cdot 10^n$ Ом.

1.2 Основні етапи калібрування ЗВТ

Невід’ємною умовою забезпечення єдності вимірювань є метрологічна простежуваність – властивість результату вимірювання, відповідно до якої він може бути співвіднесений з основою для порівняння через документований нерозривний ланцюг калібрувань, кожен з яких робить свій внесок у невизначеність вимірювань [40], п. 2.43.

Основні етапи калібрування засобів вимірювальної техніки були нами наведені у статті [2], де ми розглянули наступні 5 етапів:

- 1) підготовка до калібрування;
- 2) вимірювальний експеримент;
- 3) обробка експериментальних даних;
- 4) оформлення результатів калібрування;
- 5) використання результатів калібрування на практиці.

На всіх етапах калібрування має низку особливостей, які ми систематизували для його правильного здійснення.

Калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) здійснюють підприємства, організації або їх відокремлені підрозділи, які називаються калібрувальними лабораторіями (КЛ) [41].

При цьому відповідно до вимог стандарту ISO/IEC 17025:2017 [42], п. 7.6.2, КЛ повинні оцінювати невизначеність вимірювань для всіх калібрувань.

Отримане при калібруванні засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) значення розширеної невизначеності U використовується в подальшому для:

- оцінювання невизначеності вимірювань, які проводить Замовник з використанням відкаліброваного ЗВТ;

- прийняття рішення (Замовником або КЛ) щодо відповідності відкаліброваного ЗВТ встановленим метрологічним вимогам;
- валідації та верифікації КЛ методики калібрування.

У всіх перерахованих випадках одержуваний результат залежить від достовірності визначення розширеної невизначеності ЗВТ, що калібрується. При цьому надійна оцінка розширеної невизначеності повинна враховувати призначені закони розподілу вхідних величин [43].

1.2.1 Підготовка до калібрування

Підготовка до калібрування включає наступні стадії.

1. Постановка вимірювального завдання (здійснює Замовник):

- надання певного типу ЗВТ на калібрування;
- задання точок калібрування всередині діапазону значень вимірюваної величини $[X_{c\min}; X_{c\max}]$;
- задання умов калібрування: температура T_c , тиск P_c , вологість W_c ;
- задання найбільшої необхідної (цільової) невизначеності $U_{c\max}$.

2. Вибір методу та обладнання

До обладнання КЛ відносяться ЗВТ, програмне забезпечення, еталони, стандартні зразки, довідкові дані, реактиви, витратні матеріали або допоміжні пристрої, які можуть вплинути на результати калібрування.

Все різноманіття ЗВТ, що беруть участь у калібрування, можна умовно розділити на 3 групи:

- матеріальні міри (ММ) – ЗВТ, що відтворюють у процесі використання або постійно зберігають приписані значення [40], п. 3.6.
- вимірювальні прилади (ВП) – ЗВТ, що забезпечують вихідний сигнал, що несе інформацію про значення вимірюваної величини [40], п. 3.3;
- засоби порівняння – технічні засоби або певне середовище, за допомогою яких можна виконувати порівняння один з одним мір однорідних величин або показання ВП [44], п. 6.15.

Залежно від метрологічного підпорядкування, ММ та ВП, що беруть участь у калібруваннях, поділяються на еталонні та такі, що калібруються.

Еталонний ЗВТ повинний задовольняти наступним вимогам:

- діапазон відтворюваних (вимірюваних) значень $[X_{s\min}; X_{s\max}]$, причому $X_{s\min} \leq X_{c\min}$; $X_{s\max} \geq X_{c\max}$;
- можливість відтворення (вимірювання) величини у заданих умовах калібрування: (T_c, P_c, W_c) із заданою невизначеністю $U_{s\max}$;
- найбільша інструментальна невизначеність, що досягається, повинна відповідати умові: $U_{s\max} = (0,2...0,33)MPE_c$, де MPE_c – максимально-допустима похибка ЗВТ, що калібрується [45].

Допоміжні пристрої повинні забезпечувати необхідні умови проведення калібрування (температури T_c , атмосферного тиску P_c , відносної вологості W_c). Вимоги до обладнання перераховані в п. 6.4 [42].

Метод калібрування вибирається в залежності від типів еталонного ЗВТ та ЗВТ, що калібрується (його може запропонувати Замовник або КЛ). Метод вимірювань – загальний опис логічної послідовності операцій при вимірюванні [40], п. 2.5.

В [40,46] перераховані такі методи вимірювань, які можна використовувати при калібруванні:

- метод безпосередніх вимірювань ([46], 311-02-01) – метод вимірювань, при якому значення величини визначають безпосередньо за показами ВП;
- метод вимірювання звірянням/метод порівняння з мірою ([46], 311-02-03) - метод вимірювання, заснований на порівнянні вимірюваної величини з відомою величиною того ж виду;
- метод непрямих вимірювань ([46], 311-02-02) – метод вимірювань, при якому значення величини набувають методом безпосередніх вимірювань інших величин, пов'язаних з вимірюваною величиною за допомогою відомої залежності;
- метод вимірювань заміщенням ([46], 311-02-04) – метод вимірювань

звірянням, при якому вимірювана величина заміщується відомою величиною того ж виду, обраної так, що вплив цих двох величин на вимірювальний прилад однаковий;

- метод вимірювань доповненням ([46], 311-02-05) – метод вимірювань звірянням, при якому вимірювана величина доповнюється відомим значенням величини того ж виду, вибраним так, що сума їх значень дорівнювала заданому значенню;

- диференціальний метод вимірювань ([46], 311-02-06) – метод вимірювань звірянням, заснований на вимірювань алгебраїчної різниці значень вимірюваної величини та величини того ж виду, що має відоме значення, що незначно відрізняється від значення вимірюваної величини.

- нульовий метод вимірювань ([46], 311-02-07) – диференціальний метод вимірювань, при якому різницю між значенням вимірюваної величини і відомим значенням величини того ж виду, з якою її порівнюють, доводиться до нуля.

3. Обрання (розробка) методики калібрування

Лабораторія повинна використовувати методики калібрування, що відповідають потребам замовників і які придатні для даного калібрування.

Якщо замовник не вказав метод, який треба використовувати, лабораторія повинна вибрати відповідні методи, що були викладені в міжнародних, регіональних чи національних стандартах, рекомендовані авторитетними технічними організаціями, були описані у відповідних наукових статтях чи журналах, або були рекомендовані виробником.

Стандарт ISO/IEC 17025:2005 [47] в п. 5.4.4 рекомендував включати в методику калібрування щонайменше таку інформацію:

- відповідну ідентифікацію;
- сферу розповсюдження;
- опис типу ЗВТ, що підлягає калібруванню;
- параметри або кількісні показники та границі, що підлягають визначенню;

- апаратуру та устаткування, зокрема вимоги до технічних характеристик;
- необхідні вихідні еталони та/або стандартні зразки;
- необхідні умови довкілля та необхідний період стабілізації;
- опис процедури;
- критерії та (або) вимоги для затвердження/відмови в затвердженні результату;
- дані, які реєструють, метод аналізу та форма подання;
- процедура оцінювання невизначеності вимірювань.

4. Верифікація (валідація) методик калібрування

Лабораторія повинна підтвердити, що вона може правильно використовувати застандартизовані методики, перед тим, як розпочати калібрування. Ця процедура підтвердження називається верифікацією.

У разі застосування методик, створених (розроблених) лабораторією, застандартизованих методів, використовуваних за межами цільової сфери їх поширювання, а також розширень та модифікацій застандартизованих методів, КЛ повинна підтвердити, що ці методики придатні для цільового використання. Ця процедура підтвердження називається валідацією.

Для визначання ефективності методики потрібно використовувати один або поєднання кількох прийомів [42], п. 7.2.2.1:

- калібруванням або оцінювання зміщення та прецизійності з використанням еталонів або стандартних зразків;
- порівнянням результатів, досягнутих за допомогою інших методів, які є валідованими;
- міжлабораторними порівняннями;
- систематичним оцінюванням чинників, впливаючих на результат;
- оцінюванням невизначеності вимірювань на основі розуміння теоретичних принципів методу та досвіду його реалізації.

Верифікація (валідація) методик калібрування повинна проводитися в заданих Замовником умовах (T_c , P_c , W_c), і для всього діапазону значень вимірюваної величини $[X_{c\min}; X_{c\max}]$.

1.2.2 Вимірювальний експеримент

Вимірювальний експеримент проводиться відповідно до обраного методу вимірювань. Одні й самі методи вимірювань, які застосовуються як при повірці, так і при калібруванні ММ і ВП, докладно описані в [48].

При калібруванні ВП трьома найпоширенішими методами застосовують схеми калібрування, зображені на рис. 1.8.

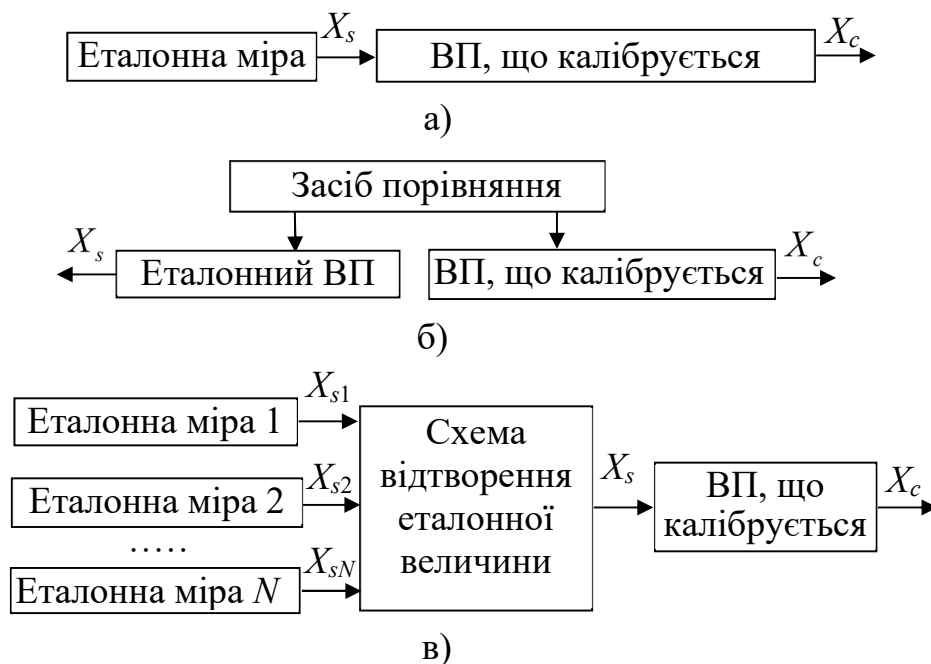


Рисунок 1.8 – Схеми калібрування ВП

а) пряме вимірювання ВП, що калібрується, величини, яка відтворюється еталонною мірою; б) зрівняння еталонного ВП, та ВП, що калібрується за допомогою приладу порівняння; в) непряме відтворення величини, що вимірюється ВП, що калібрується за допомогою еталонних ММ

При калібруванні ММ трьома найпоширенішими методами застосовують схеми калібрування, зображені на рис. 1.9.

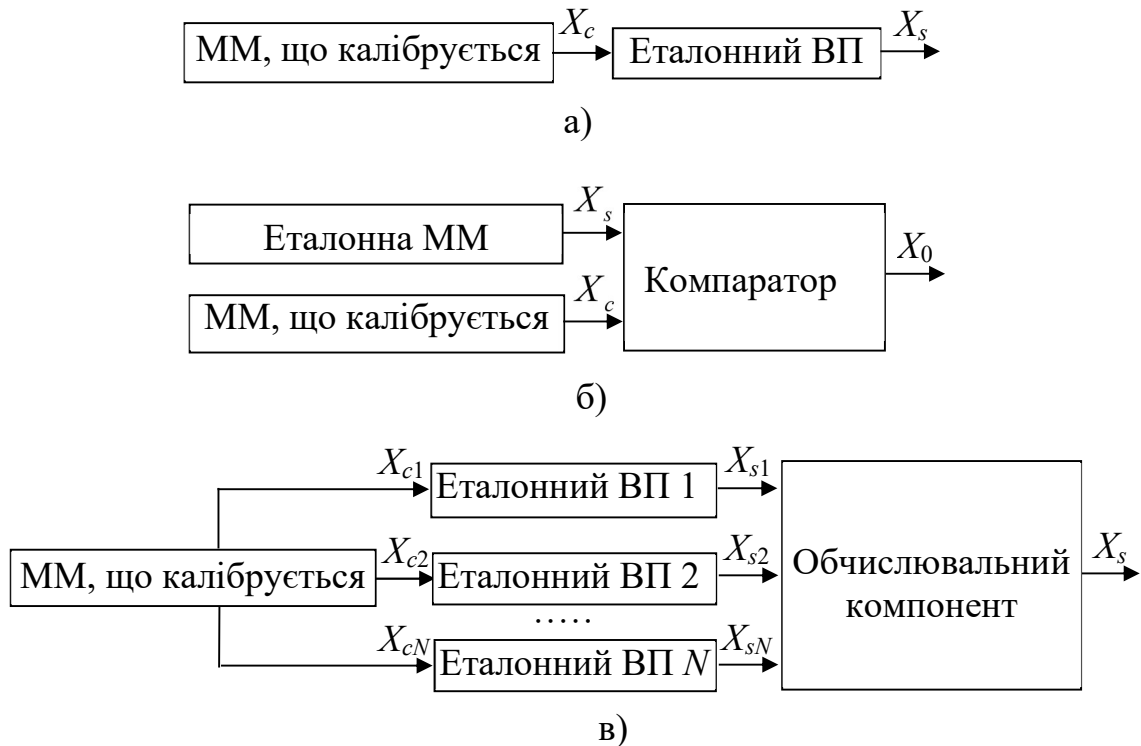


Рисунок 1.9 – Схеми калібрування ММ

- а) пряме вимірювання еталонним ВП, величини, що відтворюється ММ, що калібрується; б) зрівняння еталонної ММ, та ММ, що калібрується, за допомогою компаратора; в) непряме вимірювання величини, що відтворюється ММ, що калібрується, за допомогою еталонних ВП.

1.2.3 Обробка експериментальних даних

Обробка експериментальних даних, отриманих в результаті вимірювального експерименту під час калібрування, включає наступні операції [49, 50].

1) Запис математичної моделі калібрування. Для наведених на рис. 1.8, 1.9 схем калібрування, математичні моделі розглянуті в [48].

2) Оцінювання вхідних величин. Значення вхідних величин знаходять шляхом їх вимірювання з одноразовими або багаторазовими спостереженнями або беруть із зовнішніх джерел.

3) Обчислення оцінки результату вимірювання. Оцінку вихідної величини отримують при підстановці в математичну модель оцінок вхідних величин.

4) Обчислення стандартних невизначеностей вхідних величин. Здійснюється методом оцінювання типу *A* або типу *B*. В методі типу *A* стандартна невизначеність вимірювання оцінюється за допомогою статистичного аналізу ряду спостережень. У цьому випадку стандартна невизначеність вимірювання є експериментальним стандартним відхиленням середнього значення, яке отримується за допомогою методів усереднення. В методі типу *B* стандартна невизначеність оцінюється іншими способами, ніж статистичний аналіз ряду спостережень та ґрунтується на інших наукових знаннях.

5) Обчислення внеску невизначеності вхідної величини в невизначеність вимірюваної величини. Визначають як добуток невизначеності вхідної величини на коефіцієнт чутливості, який показує, як оцінка вихідної величини буде змінюється зі зміною оцінки вхідних величин та знаходиться як частинні похідні вихідної величини по кожній з вхідних величин.

6) Визначення стандартної невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності) здійснюється за формулами, що називаються законом поширення невизначеності. За відсутністю кореляцій між вхідними величинами стандартна невизначеність вихідної величини визначається як корінь квадратний з суми квадратів усіх внесків невизначеності. За наявності кореляцій між вхідними величинами під коренем додаються всі коваріації між вхідними величинами.

7) Обчислення розширеної невизначеності. Розширену невизначеність отримують шляхом множення невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності) на коефіцієнт охоплення, його наближене значення для рівня довіри 0,9545 дорівнює 2.

За наявності внесків невизначеності типу *A*, GUM [49] рекомендує брати в якості коефіцієнту охоплення коефіцієнт Стьюдента для рівня довіри 0,9545

та ефективного числа степенів свободи, що визначається за формулою Велча-Саттерсвейта.

Надійна оцінка розширеної невизначеності не може бути отримана без урахування законів розподілу вхідних величин, що зазвичай робиться методом Монте-Карло (МКМ) [43]. Для завдань калібрування надійну оцінку розширеної невизначеності можна отримати за допомогою методу ексцесів [51]. Його застосування дозволяє автоматизувати розрахунок невизначеності, причому оцінки розширеної невизначеності будуть близькі до оцінок, отриманим МКМ.

1.2.4 Оформлення підсумків калібрування

При оформленні підсумків калібрування роблять наступні операції:

- складання бюджету невизначеності вимірювань;
- оформлення калібрувального сертифіката.

Бюджет невизначеності вимірювань вперше з'явився в [50] як закономірний результат оцінювання невизначеності вимірювань. Отримані в процесі реалізації базового алгоритму оцінювання невизначеності вимірювань проміжні результати зручно представляти у вигляді бюджету невизначеності, який включає в себе список усіх вхідних величин, їх оцінок разом з приписаними їм стандартними невизначеностями вимірювання, коефіцієнтами чутливості та числами степенів свободи (або ексцесами). Крім інформації про вхідні величини до бюджету зручно включати інформацію про вимірювану величину: результат вимірювання, сумарну стандартну невизначеність, ефективне число степенів свободи (ексцес), коефіцієнт охоплення і розширену невизначеність.

Оскільки бюджет невизначеності є таблицею, він дозволяє при використанні програми Excel автоматизувати рутинний процес оцінювання невизначеності, зменшуючи час розрахунків та підвищуючи їх достовірність.

Загальні вимоги до оформлення сертифіката про випробування,

калібрування або відбору зразків перелічені в [42], п. 7.8.2. Спеціальні вимоги до сертифікатів калібрування наведені в [42], п. 7.8.4 та містять таку інформацію:

а) значення невизначеності вимірювань для результату вимірювань, надане в тих самих одиницях, що і величина, що вимірюється, або у відносному по відношенню до вимірюваної величини вигляді (наприклад у відсотках).

б) відомості про умови (наприклад, умови довкілля), за яких виконувались калібрування та які могли б вплинути на результати вимірювань;

с) заяву про те, яким чином забезпечується метрологічне простежування вимірювань;

д) результати, отримані до та після регулювання та ремонту, якщо такі проводились;

е) заяву про відповідність вимогам або специфікаціям у разі потреби;

ф) думки та інтерпретації (див. п. 7.8.7 [42]) у разі потреби.

Сертифікат калібрування або калібрувальна етикетка не повинен містити жодних рекомендацій щодо вибору міжкалібрувальних інтервалів, крім тих випадків, коли це було погоджено із Замовником.

1.2.5 Використання результатів калібрування на практиці

Результати калібрування найчастіше використовують на практиці для оцінювання невизначеності проведених Замовником вимірювань з використанням відкаліброваного ЗВТ. Це питання добре опрацьовано у існуючих документах щодо невизначеності вимірювань [49, 50].

Крім того, результати калібрування використовується КЛ для:

- ухвалення рішення про відповідність відкаліброваного ЗВТ встановленим метрологічним характеристикам;
- валідації та верифікації методики калібрування.

1.3 Класифікація існуючих методів калібрування засобів вимірювання та відтворювання значень електричного опору

В основі вимірювання використовується певний принцип, під яким розуміється фізичне явище або сукупність фізичних явищ використаних для одержання результату у вигляді вимірювальної інформація про значення вимірюваної фізичної величини.

У той же час вимірювання можуть бути проведені з використанням різних методів, під якими розуміється сукупність прийомів використання різних принципів та засобів вимірювань для створення вимірювальної інформації [52-64].

Розрізняють прямі та непрямі методи вимірювань.

У метрології в процесі вимірювань найширше застосовуються прямі методи вимірювання, що забезпечують визначення шуканої величини за експериментальними даними.

При непрямих вимірюваннях широко застосовується перетворення вимірюваної величини в процесі вимірювання.

До прямих методів вимірювання відносяться два основних методи вимірювань:

- 1) метод безпосередньої оцінки;
- 2) метод порівняння з мірою.

Метод порівняння з мірою, в свою чергу, об'єднує наступні методи:

- 1) диференціальний метод;
- 2) компенсаційний (нульовий) метод;
- 3) метод співпадінь (збігу).

1.3.1 Прямі методи вимірювання опорів

Для прямих вимірювань опорів в діапазоні від 10^{-5} до 10^9 можна використовувати магнітоелектричні омметри та мегаомметри, а для більших

опорів – електронні мегаометри та тераомметри.

Схема вимірювання і характеристики цих приладів докладніше були розглянуті у п. 1.1 цієї роботи.

1.3.2 Непрямі методи вимірювання опорів

Опори також можна вимірювати непрямим методом за допомогою амперметра і вольтметра за схемами, наведеними на рис. 1.10, із подальшим розрахунком вимірюваного опору за законом Ома:

$$R_X = \frac{U_B}{I_A}, \quad (1.6)$$

де U_B – покази вольтметра, I_A – покази амперметра.

Результат розрахунку за цією формулою (1.6) відрізняється від дійсного значення вимірюваного опору через власне споживання енергії приладами. Метод амперметра-вольтметра застосовується для вимірювання опорів у колах постійного і змінного струмів. Точність визначення опорів цим методом залежить як від точності приладів, так і від схем вмикання.

При вимірюванні відносно невеликих опорів (менших 1 Ом) схема на рис. 1.10 а, є кращою, оскільки вольтметр під'єднаний безпосередньо до вимірюваного опору R_X , а струм I_A , що вимірюється амперметром, дорівнює сумі струму у вимірювальному опорі I_X і струму у вольтметрі I_V , тобто $I_A = I_X + I_V$. Оскільки $I_X \gg I_V$, то $I_A \approx I_X$.

При вимірюванні відносно великих опорів (більше 1 Ом) кращою є схема на рис. 1.10 б, оскільки амперметр безпосередньо вимірює струм в опорі R_X , а напругу U_B , яка вимірюється вольтметром дорівнює сумі напруг на амперметрі U_A і на вимірювальному опорі U_X , тобто $U_B = U_X + U_A$. Оскільки $U_X \gg U_A$, то $U_B \gg U_X$.

Принципові схеми вмикання приладів для вимірювання повного опору елементів Z_X кола змінного струму методом амперметра-вольтметра ті ж самі, що і для вимірювання опорів R_X (рис.1.10, а і б).

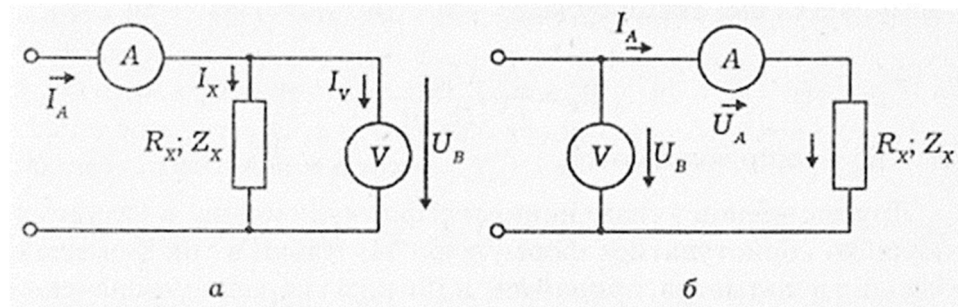


Рисунок 1.10 – Схема непрямого вимірювання опору за допомогою амперметра і вольтметра [39]

В цьому випадку за виміряними значеннями напруги U_B і I_A визначають повний опір $Z_X = \frac{U_B}{I_A}$.

Для схеми на рис.1.10 а, покази амперметра відповідають значенню струму I_A , що більший від струму I_X на величину I_V . точна формула для цієї схеми буде:

$$R_X = \frac{U_B}{I_A - U_B/R_B},$$

де R_B – опір вольтметра.

Другим членом у знаменнику цієї формули можна знехтувати, і потрібно користуватись формулою (1.6) тільки в тих випадках, коли опір вольтметра, принаймні, в 100 разів перевищує значення опору, який вимірюється.

У другій схемі (рис.1.10 б) показам вольтметра U_B відповідає не падіння напруги U_X на вимірюваному опорі, а сума спадів напруг на R_X і на обмотці амперметра U_A , тому точна формула для обчислень R_X буде:

$$R_X = \frac{U_B - I_A \cdot R_A}{I_A},$$

де R_A – опір обмотки амперметра, яким можна знехтувати, якщо він менший, ніж 1 % від R_X .

Схема (рис.1.10 а) може застосовуватись у виробничих умовах, а друга схема (рис.1.10 б) часто застосовується часто в лабораторних умовах при вимірюванні великих опорів.

Непряме вимірювання опору можна також виконати за допомогою тільки одного вольтметра, власний опір якого R_B повинен бути відомий (рис.1.11). Перемкнувши перемикач у положення 1, вимірювання вольтметром V напругу джерела струму U_1 . Потім переключивши перемикач K у положення 2 включають вольтметр послідовно з опором R_X . Покази вольтметра при цьому зменшаться і будуть відповідати тільки частині напруги U_2 , що дорівнює падінню напруги на вольтметрі, тобто $U_2 = I_2 \cdot R_B$, де I_2 – струм, що проходить через вольтметр і вимірюваний опір. Значення струму I_2 можна виразити формулою:

$$I_2 = \frac{U_1 - U_2}{R_X}.$$

Із останніх двох рівнянь отримуємо:

$$R_X = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot R_B \quad (1.7)$$

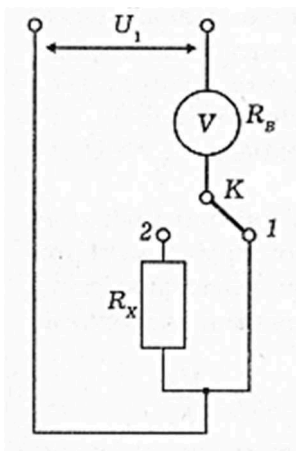


Рисунок 1.11 – Схема вимірювання опору вольтметром [39]

1.3.3 Мостовий метод вимірювань опору

Мостовий метод вимірювань застосовується для точних вимірювань опору в діапазоні від 10^{-8} до 10^{16} Ом. Одинарні мости з двозатискачевим підімкненням вимірюваного опору мають обмежену нижню границю вимірювань десятками Ом через вплив опорів з'єднувальних дротів на

результат вимірювання. Щоб зменшити цей вплив в одинарних мостах застосовують чотирьохзатискачеве під'єднання резисторів, завдяки якому нижня границя вимірювань одинарних мостів класу 0,05 досягає тисячні частки Ом. Дуже малі опори вимірюють подвійними мостами постійного струму, діапазон вимірювань яких зазвичай лежить в межах від 10^{-8} до 100 Ом.

Обов'язковою умовою виконання вимірювань із заданою точністю є забезпечення відповідної чутливості мостів, при якій похибка квантування була би меншою від похибки моста. Зокрема, при нульовому методі вимірювань досить забезпечити таку чутливість, при якій відхилення від рівноваги моста, викликане відносною зміною опору плеча порівняння $\varepsilon = \Delta_R/R$ на величину допустимої похибки вимірювань, відповідало б відхиленню вказівника нуль-індикатора на одну поділку. Тоді похибка квантування $\delta_{\text{кв}} = \pm 0,5 \Delta_R/R$. Чутливість залежить від значень опорів плеч моста, параметрів нуль-індикатора та джерела живлення. Практично для кожного конкретного випадку може бути декілька варіантів плеч моста, які задовольняють умову рівноваги, але не рівноцінні за чутливістю. Оптимальним вважають варіант, який забезпечує достатню чутливість схеми при відносно невисокій чутливості нуль-індикатора. У випадку, коли задані наближене значення вимірюваного опору R_X , допустима похибка вимірювання $\delta_{\text{вим}}$, номінальна потужність вимірюваного опору $P_{\text{ном.}X}$ та номінальна потужність плеч моста $P_{\text{ном.}M}$, вибір оптимальних параметрів раціонально проводити за потужністю, що виділяється в колі гальванометра як нуль-індикатора, за формулою:

$$P_{\Gamma} = I_{\Gamma}^2 \cdot R_{\Gamma} = (C_i \cdot \alpha)^2 \cdot R_{\Gamma} = \varepsilon^2 \cdot P_{\text{max}} \frac{R_{\text{min}}}{\sum R} \cdot \frac{k}{(1+k)^2},$$

де C_i – ціна поділки шкали гальванометра; α – кут відхилення вказівника; R_{Γ} – опір гальванометра; P_{max} – потужність в найбільш навантаженому плечі моста; R_{min} – опір найбільш низькоомного плеча моста; $\sum R$ – сума всіх плеч моста; $k = R_{\Gamma}/R_{M,\Gamma}$ – відношення опору гальванометра до вихідного опору моста відносно гальванометра.

Для одинарного моста (рис.1.12 а)

$$R_{\text{М.Г}} \approx \frac{(R_X + R) \cdot (R_A + R_B)}{R_X + R + R_A + R_B},$$

для подвійного моста (рис.1.12 б)

$$R_{\text{М.Г}} \approx \frac{(R_X + R + R') \cdot (R_N + R_A + R_B)}{R_X + R_N + R + R_A + R_B + R'}.$$

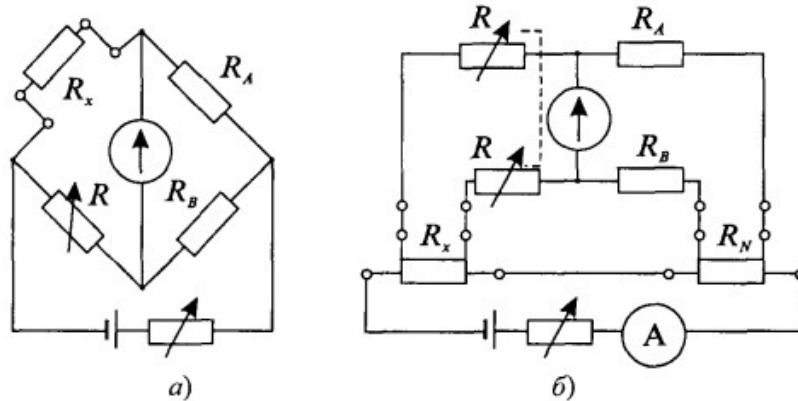


Рисунок 1.12 – Схема одинарного а) та подвійного б) мостів змінного струму

За умови, що номінальна потужність досліджуваного резистора не менша за номінальну потужність моста, P_{Γ} буде максимальним при максимумі відношення $R_{\min}/\Sigma R$.

Це означає, що необхідно вибирати опори всіх плеч моста по можливості близькими один до одного, оскільки $R_{\min}/\Sigma R$ має максимальне значення $1/4$ при $R_X = R_A = R_B = R$.

Вибір опору гальванометра пов'язаний з функцією $k/(1+k)^2$. Ця функція має максимум при $k = 1$. Отже, для забезпечення максимального значення P_{Γ} необхідно обирати гальванометр, опір якого по можливості близький до вихідного опору моста.

Вимірювання опорів за допомогою потенціометра виконується за схемою наведеною на рис. 1.13.

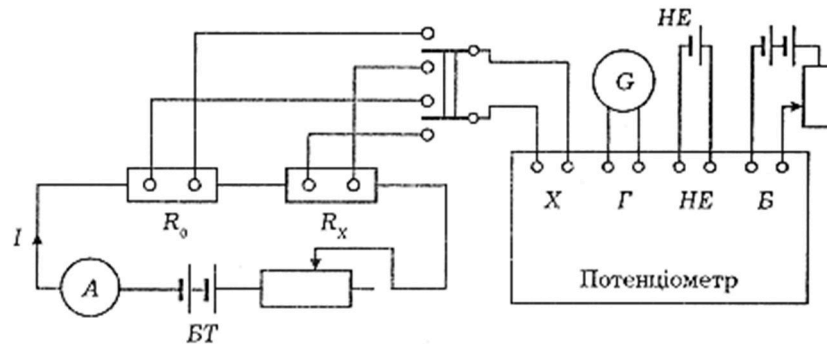


Рисунок 1.13 – Схема вимірювання опору за допомогою потенціометра [39]

Опір R_X , що вимірюється, з'єднується послідовно із зразковою мірою опору R_0 і в їхньому колі встановлюється струм I . Потенціометром по чергові вимірюють спад напруги на R_X і R_0 . Отримані при цьому покази потенціометра будуть:

$$N_X = IR_X \text{ та } N_0 = IR_0 .$$

При діленні N_X на N_0 отримуємо

$$\frac{N_X}{N_0} = \frac{R_X}{R_0} ,$$

звідси

$$R_X = R_0 \cdot \frac{N_X}{N_0} .$$

1.3.4 Метод заміщення

Метод заміщення використовують для більш точних вимірювань опору, вимірювань з похибкою, меншою, ніж основна, яка визначається класом точності моста. В основу метода покладене заміщення вимірюваного опору зразковим, якомога ближчим за значенням до вимірюваного.

Вимірювання здійснюється наступним чином:

1) до затискачів X моста під'єднують зразковий резистор і, зрівноваживши міст, відраховують показ:

$$R_N = R_{II.N} \cdot \frac{R_A}{R_B},$$

де $R_{II.N}$ – показ плеча порівняння моста;

2) замість зразкового резистора тими ж провідниками до затискачів X під'єднують вимірюваний опір i , повторно зрівноваживши міст за допомогою плеча порівняння, отримують другий показ:

$$R_X = R_{II.X} \cdot \frac{R_A}{R_B},$$

де $R_{II.X}$ – показ плеча порівняння моста.

Розв'язуючи систему цих двох рівнянь i , підставивши замість R_N дійсне значення опору зразкового резистора $R_{N,д}$ (за його паспортом), визначають дійсне значення вимірюваного опору:

$$R_{X,д} = R_{N,д} \cdot \frac{R_{II.X}}{R_{II.N}}.$$

1.4 Аналіз методів оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні ЗВТ

Аналіз літератури [65-74] показав, що на практиці для оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні ЗВТ застосовується базовий алгоритм GUM та метод Монте-Карло, наведений у Доповненні 1 до GUM.

1.4.1 Базовий алгоритм GUM та його недоліки

Даний алгоритм описано в GUM [78] і включає у себе наступні операції.

1. Складання модельного рівняння

Модельне рівняння виражає залежність між вихідною (вимірюваною) величиною Y та вхідними величинами X_1, X_2, \dots, X_N :

$$Y = f(X_1, \dots, X_N) \quad (1.8)$$

2. Оцінювання вхідних величин

Значення вхідних величин знаходять шляхом їх вимірювання з однократними (одиничними) або багатократними (повторними) спостереженнями або беруть із зовнішніх джерел.

При проведенні багатократних вимірювань за значення вхідної величини приймають середнє арифметичне результатів ряду окремих спостережень:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_q \quad (1.9)$$

3. Обчислення оцінки результату вимірювань

Оцінку вимірюваної величини y отримують при підстановці в модельне рівняння оцінок вхідних величин x_1, \dots, x_N :

$$y = f(x_1, \dots, x_N). \quad (1.10)$$

4. Обчислення стандартних невизначеностей вхідних величин

Стандартна невизначеність вимірювання типу A i -ї вхідної величини x_i розраховується за формулою:

$$u_A(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (1.11)$$

де n_i – кількість спостережень, виконаних при вимірюванні x_i .

Стандартна невизначеність вимірювання типу B i -ї вхідної величини знаходиться в залежності від апріорної інформації про мінливість вхідної величини, що виражена стандартним відхиленням s , нижньою α^- і верхньою α^+ межами інтервала, в межах якого знаходяться можливі її значення або розширеною невизначеністю U .

5. Обчислення вкладу невизначеності вхідної величини в невизначеність вимірюваної величини

Внесок невизначеності кожної вхідної величини $u(x_i)$ в невизначеність вимірюваної величини $u_i(y)$ (сумарну стандартну невизначеність) визначають як добуток $u(x_i)$ на коефіцієнт чутливості c_i :

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i). \quad (1.12)$$

Коефіцієнти чутливості c_i показують, як оцінка вхідної величини y буде змінюватися зі зміною вхідних величин x_i . Їх знаходять як частинні похідні вихідної величини за кожною із вхідних величин:

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_N} \quad (1.13)$$

Для модельного рівняння у вигляді лінійної комбінації вхідних величин виду

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_N X_N, \quad (1.14)$$

де a_1, a_2, \dots, a_N – постійні коефіцієнти, коефіцієнти чутливості дорівнюють коефіцієнтам при вхідних величинах:

$$c_1 = a_1, c_2 = a_2, \dots, c_N = a_N. \quad (1.15)$$

Для модельного рівняння у вигляді добутку або похідної від ділення вхідних величин, наприклад:

$$Y = \frac{X_1 X_2}{X_3} \quad (1.16)$$

модулі коефіцієнтів чутливості дорівнюють модулям відношень значення вимірюваної величини y до значень відповідної вхідної величини:

$$|c_1| = \left| \frac{y}{x_1} \right|, |c_2| = \left| \frac{y}{x_2} \right|, |c_3| = \left| \frac{y}{x_3} \right|. \quad (1.17)$$

б) Розрахунок стандартної невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності)

Через внески невизначеності

Розрахунок стандартної невизначеності здійснюється за формулою, яка називається законом розподілу невизначеності. За відсутності кореляції між результатами вимірювань вхідних величин стандартна невизначеність вихідної величини визначається як

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{c_1^2 u^2(x_1) + c_2^2 u^2(x_2) + \dots + c_N^2 u^2(x_N)}, \quad (1.18)$$

причому для i -й вхідної величини справедливий вираз:

$$u(x_i) = \sqrt{u_A^2(x_i) + u_B^2(x_i)}. \quad (1.19)$$

Через відносні невизначеності вхідних величин

Для рівняння, наведеного в формулі 1.12 можна уникнути обчислення коефіцієнтів чутливості, якщо сумарну стандартну невизначеність обчислювати через відносні невизначеності вхідних величин

$$\tilde{u}(x_i) = u(x_i) / x_i \quad (1.20)$$

за формулою:

$$u_c(y) = y \sqrt{\sum_{i=1}^N \tilde{u}^2(x_i)}. \quad (1.21)$$

7. Розрахунок коефіцієнта охоплення

Коефіцієнт охоплення k представляє із себе множник, на якій помножують оцінку стандартної сумарної невизначеності u_c для отримання розширеної невизначеності U . Його значення для рівня довіри 0,9545 дорівнює 2.

Обчислення коефіцієнта охоплення за наявності суттєвих внесків невизначеності типу A

За наявності внесків невизначеності типу A, GUM рекомендує брати в якості коефіцієнта охоплення коефіцієнт Стюдента для ймовірності 0,9545 і ефективного числа ступенів свободи v_{eff} :

$$k = t_{0,9545}(v_{eff}). \quad (1.22)$$

У межі, при $v_{eff} \rightarrow \infty$, $k = 2$ (коефіцієнт для нормального закону розподілу для ймовірності 0,95).

Ефективне число ступенів свободи визначається за формулою Велча-Саттерсвейта:

$$v_{eff} = u^4(y) / \sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}. \quad (1.23)$$

де v_i – число ступенів свободи i -ї вхідної величини.

Значення чисел ступенів свободи для різних видів стандартних

невизначеностей вхідних величин наведені в табл. 1.2.

Для прямих багаторазових вимірювань (або для опосередкованих багаторазових вимірювань з однією вхідною величиною, що оцінюється за типом *A*) з числом спостережень *n* формула (1.23) може бути представлена у вигляді:

$$v_{eff} = (n-1) \left[\frac{u_c(y)}{u_A} \right]^4. \quad (1.24)$$

Таблиця 1.2

Значення чисел ступенів свободи стандартних невизначеностей вхідних величин

Стандартна невизначеність вхідної величини	v_i
Типу <i>A</i> , для <i>n</i> вимірювань	<i>n</i> -1
Типу <i>B</i> , СКВ однократних вимірювань, визначене за попередньо проведеними <i>n</i> вимірюваннями	<i>n</i> -1
Типу <i>B</i> , обчислені через межі, наведені без вказування рівня довіри, наприклад межі допустимої похибки ЗВТ	∞
Типу <i>B</i> , обчислені через розширену невизначеність <i>U</i> і коефіцієнт охоплення <i>k</i> , рівний коефіцієнту Стьюдента для ефективного числа ступенів свободи v_{eff} і ймовірності 0,9545	v_{eff}

Обчислення коефіцієнта охоплення за відсутності внесків невизначеності типу A

За відсутності внесків невизначеності типу *A* формула (1.24) дає нескінченність, тому коефіцієнт охоплення формально повинен дорівнювати коефіцієнту Стьюдента від нескінченності для ймовірності 0,9545, тобто $k = t_{0,9545}(\infty) = 2$. Однак таке значення коефіцієнта охоплення відповідає випадку, коли значенням вимірюваної величини *Y* приписують нормальний закон розподілу, що має місце тоді, коли усі вклади невизначеності типу *B* розподілені за нормальним законом, або коли є більше чотирьох *рівнозначних* вкладів, розподілених за будь-яким іншим законом.

Нормальний закон для ймовірності 1,0 має нескінченні границі. Для обмеження інтервалу можливих значень Y при вказуванні розширеної невизначеності використовують ймовірність (рівень довіри) $p = 0,95$.

Якщо серед внесків невизначеності є домінуючі (що відрізняються не менше ніж у 3 рази від інших), розподілені за рівномірним законом, закон розподілу вихідної величини вже неможна вважати нормальним. В цьому випадку коефіцієнт охоплення можна взяти з табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Значення коефіцієнтів охоплення для двох домінуючих рівномірно розподілених вкладів невизначеності типу B

u_{B2}/u_{B1}	0-0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9-1,0
k	1,65	1,70	1,75	1,80	1,83	1,86	1,88	1,89	1,90

У табл. 1.3 u_{B1} і u_{B2} – відповідно значення найбільшого і другого за величиною вкладів невизначеності типу B .

8. Обчислення розширеної невизначеності

Розширену невизначеність отримують шляхом множення невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності) на коефіцієнт охоплення:

$$U(y) = k \cdot u_c(y). \quad (1.25)$$

9. Запис повного результату вимірювань

Повний результат вимірювань включає у себе оцінку вихідної величини та приписане їй значення розширеної невизначеності з вказуванням рівня довіри:

$$Y = y \pm U, p = 0,95. \quad (1.26)$$

При записі результату слід дотримуватись наступних правил округлення:

- Значення розширеної невизначеності вказується з двома значущими цифрами. При цьому використовується правило округлення: якщо цифра старшого з розрядів, що відкидаються менша 5, тоді цифри, що залишились у

числі не змінюють; якщо ця цифра дорівнює або більше 5, тоді останню цифру, що залишилась збільшують на одиницю.

- Вимірне значення повинне закінчуватись цифрою того ж розряду, що й округлена розширена невизначеність.

10. Складання бюджету невизначеності

Всі отримані у процесі реалізації базового алгоритму результати можна представляти у вигляді бюджету невизначеності вимірювань (табл. 1.4), який включає у себе список усіх вхідних величин, їх оцінок разом з приписаними їм стандартними невизначеностями вимірювання, коефіцієнтами чутливості та числами степенів свободи. Окрім інформації про вхідні величини в бюджет зручно включати інформацію про вимірювану величину: вимірне значення, сумарну стандартну невизначеність, ефективне число степенів свободи, коефіцієнт охоплення та розширену невизначеність.

Таблиця 1.4

Бюджет невизначеності вимірювань

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність вхідної величини	Число степенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Вклад невизначеності
X_1	x_1	$u(x_1)$	ν_1	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	ν_2	c_2	$u_2(y)$
...
X_N	x_N	$u(x_N)$	ν_N	c_N	$u_N(y)$
Вимірювана величина	Вимірне значення	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число степенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
Y	y	$u(y)$	ν_{eff}	k	U

Однак використання GUM пов'язано з низкою недоліків, основним з яких є незалежність одержуваних оцінок розширеної невизначеності від щільностей ймовірностей вхідних величин і наявності зміщення числових значень вимірюваної величини та її стандартної та розширеної

невизначеностей при нелінійних модельних рівняннях. Саме тому Робочою групою 1 (WG-1) Об'єднаного комітету з настанов в метрології (JCGM) розроблено Доповнення 1 до GUM основане на методі Монте-Карло [85], який усуває зазначені недоліки.

1.4.2 Реалізація методу Монте-Карло для оцінювання невизначеності вимірювань

Перелічені вище обмеження та недоліки методики GUM [49] призвели до необхідності застосування чисельних методів для оцінювання невизначеності вимірювань [79]. Цей метод застосовують у випадках, коли порушуються умови застосування закону розповсюдження невизначеності (ЗРН) і центральної граничної теореми теорії ймовірності (ЦГТТЙ), які покладені в основу GUM [79, п.1]:

- внесок різних складових невизначеності може бути суттєво неоднаковим;
- розподіл вихідної величини не можна вважати ні нормальним, ні масштабованим зміщеним t -розподілом;
- оцінка вихідної величини та відповідна стандартна невизначеність мають приблизно однакове значення;
- модель вимірювання нелінійна, і обмеження членами першого порядку розкладання в ряд Тейлора цієї залежності не може розглядатися як допустиме наближення;
- щільності розподілу ймовірностей вхідних величин асиметричні;
- важко чи незручно знаходити часткові похідні від функції вимірювання, для обчислення внесків невизначеності.

ММК базується на використанні функції щільності ймовірності (PDF) вхідних величин для подальшого розрахунку PDF вихідної величини. Маючи PDF вихідної величини, можна визначити його математичне сподівання, що використовується як оцінка вихідної величини, і стандартне відхилення, яке

використовується як стандартна невизначеність цієї оцінки. Крім того, PDF вихідної величини може бути використана для отримання інтервалу її охоплення, який відповідає заданій ймовірності.

Основні етапи оцінювання невизначеності вимірювань на основі ММК включають формулювання вимірювального завдання, розповсюдження розподілів і отримання остаточного результату.

Формулювання вимірювального завдання включає:

- 1) задання вихідної величини Y (вимірюваної величини);
- 2) виявлення вхідних величин X_1, X_2, \dots, X_N , від яких залежить вихідна величина Y ;
- 3) складання моделі вимірювання $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, що визначає взаємозв'язок Y з вхідними величинами X_1, X_2, \dots, X_N ;
- 4) приписування PDF вхідним величинам $g(X_1), g(X_2), \dots, g(X_N)$ (або спільного PDF величинам, які є залежними) на основі наявної інформації.

Розповсюдження PDF через модель передбачає визначення PDF вихідної величини $g(Y)$ на основі PDF вхідних величин $g(X_1), g(X_2), \dots, g(X_N)$ і моделі вимірювання $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, яка використовується.

Отримання остаточного результату передбачає використання PDF вихідної величини $g(Y)$ для визначення:

- 1) оцінки математичного сподівання величини $E(Y)$ як оцінки u ;
- 2) оцінки стандартного відхилення величини Y у вигляді стандартної невизначеності $u(y)$, яка є асоційованою з u ;
- 3) інтервалу охоплення для величини Y , який відповідає заданій ймовірності охоплення p .

Інтервал охоплення Y може бути визначений на основі функції розподілу $G_Y(\xi)$. Якщо задати необхідну ймовірність охоплення p і взяти будь-яке число α з інтервалу від нуля до $(1-p)$, то границями $100p$ %-го інтервалу охоплення для Y будуть значення $G_Y^{-1}(\alpha)$ та $G_Y^{-1}(p+\alpha)$, тобто квантилі розподілу $G_Y(\xi)$ рівнів α та $(p + \alpha)$, відповідно.

Вибір $\alpha=(1-p)/2$ дозволяє визначити ймовірнісно симетричний $100p$ %-й інтервал охоплення, границями якого є квантилі рівнів $(1-p)/2$ та $(1+p)/2$.

Якщо щільність розподілу ймовірностей для Y є симетричною щодо математичного сподівання y , то отриманий інтервал буде збігатися з інтервалом $y \pm U_p$, де розширена невизначеність U_p дорівнює добутку стандартної невизначеності $u(y)$ на коефіцієнт охоплення, що відповідає даної щільності розподілу ймовірностей.

Якщо щільність розподілу ймовірностей асиметрична, то більш підходящим може бути вибір α , що відрізняється від $(1-p)/2$, наприклад, що дозволяє отримати найменший $100p$ %-й інтервал охоплення. Якщо щільність розподілу ймовірностей унімодальна, то воно має таку властивість, що найменший інтервал охоплення буде включати в себе моду цього розподілу. Даному інтервалу буде відповідати таке значення α , яке задовольняє співвідношенню $g_Y[G_Y^{-1}(\alpha)] = g_Y[G_Y^{-1}(p+\alpha)]$. У разі розподілу загального виду значення α , що відповідає найменшому $100p$ %-му інтервалу охоплення, має бути таким, щоб різниця $G_Y^{-1}(p+\alpha) - G_Y^{-1}(\alpha)$ була мінімальною.

Чисельна реалізація закону розповсюдження розподілів (ЗРР) полягає у наступних виконанні операцій, наведених на (рис. 1.14):

1) Задають PDF для вхідних величин $g(X_1), g(X_2), \dots, g(X_N)$. Сподівання та стандартні відхилення цих PDF відповідають числовим значенням вхідних величин x_1, x_2, \dots, x_N та їх стандартним невизначеностям $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$. Для корельованих вхідних величин задається спільна PDF із заданою матрицею невизначеності.

2) Генерують N наборів випадкових чисел, об'ємом $M \geq 10^6$ кожен, що мають задані в п.1 PDF вхідних величин.

3) Для встановленої моделі $f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ призводять перетворення кожної реалізації випадкових чисел $x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{Nq}$ ($q=1, 2, \dots, M$) для вхідних величин X_1, X_2, \dots, X_N у відповідні реалізації вимірюваної величини

$$f(x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{Nq}).$$

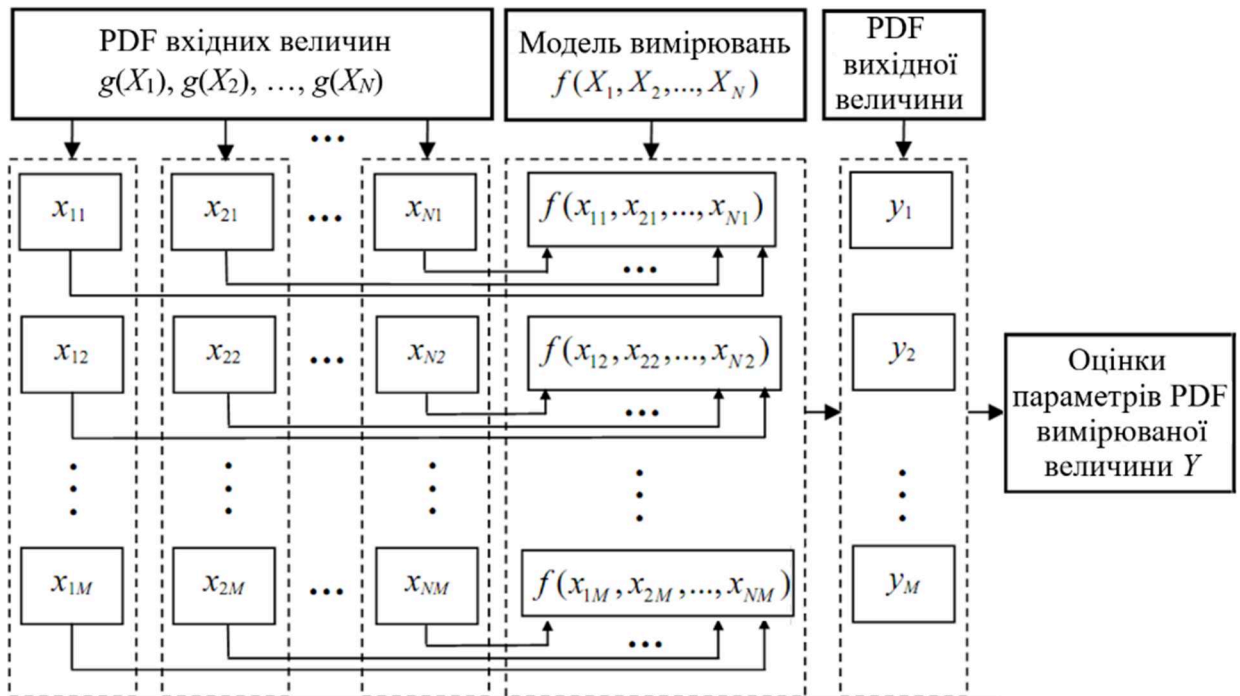


Рисунок 1.14 – Алгоритм реалізації метода Монте-Карло в GUM-S1

4) Ранжуванням отриманих реалізацій вимірюваної величини отримують набір значень y_1, y_2, \dots, y_M , що відповідає дискретному представленню функції розподілу $G_Y(\xi)$ для Y .

5) Використовують отримані значення $G_Y(\xi)$ для визначення оцінок:

- математичного сподівання $E(y)$:

$$E(y) = \frac{1}{M} \sum_{q=1}^M y_q; \quad (1.27)$$

- стандартної невизначеності $u(y)$:

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{q=1}^M (y_q - \bar{y})^2}; \quad (1.28)$$

- розширеної невизначеності U_p , яка відповідає половині ширини ймовірно-симетричного інтервалу охоплення для заданої ймовірності охоплення p :

$$U_p = \frac{1}{2} \left[y_{\frac{M(1+p)}{2}} - y_{\frac{M(1-p)}{2}} \right], \quad (1.29)$$

де $y_{\frac{M(1+p)}{2}}$ та $y_{\frac{M(1-p)}{2}}$ відповідно $\frac{M(1+p)}{2}$ та $\frac{M(1-p)}{2}$ члени ранжованого масиву даних вихідної величини y_1, y_2, \dots, y_M ;

- коефіцієнта охоплення:

$$k = \frac{U_p}{u(y)}. \quad (1.30)$$

ММК дозволяє отримати однозначне представлення PDF вимірюваної величини для заданої моделі вимірювань і заданих PDF її вхідних величин. Дані про випадкову змінну і вид відповідної PDF, які можна використовувати при завданні законів розподілу вхідних величин наведено в Табл. 1.5.

Слід зазначити, що прямому використанню ММК для оцінювання невизначеності вимірювань у випробувальних та калібрувальних лабораторіях, які є акредитованими на відповідність вимогам стандарту ISO/IEC 17025:2017 [42], заважають наступні фактори:

- відмінність оцінок невизначеності вимірювань, що одержано під час використання ММК від оцінок, які одержано з використанням підходу GUM;
- відсутність спеціалізованих сертифікованих програмних засобів для оцінювання невизначеності вимірювань на основі ММК;
- неможливість документування покрокової процедури оцінювання невизначеності вимірювань на основі ММК.

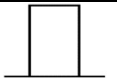
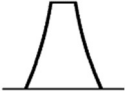
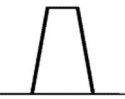


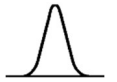



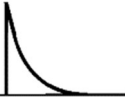
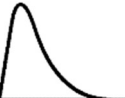
Тому ММК можна розглядати як референтний метод, що дозволяє здійснити валідацію методик оцінювання невизначеності при суттєво нелінійних моделях вимірювань, наявності домінуючих аномальних внесків у бюджеті невизначеності.

Для усунення перерахованих недоліків нами були розроблені процедури оцінювання невизначеності вимірювань, засновані на методі ексцесів і законі поширення розширеної невизначеності, що дозволяють забезпечити отримання оцінок числових значень і невизначеності результату вимірювань,

порівнянних з оцінками, які одержують при використанні ММК.

Таблиця 1.5

Інформація про випадкову змінну та вигляд відповідної PDF

Інформація про величину	Розподіл ймовірностей	
Нижня і верхня границі: a, b	Рівномірний $R(a, b)$	
Неточно відомі нижня та верхня границі: $a \pm d, b \pm d$	Криволінійно-трапецеїдальний СТрап (a, b, d)	
Сума двох рівномірно розподілених величин з границями (a_1, b_1) и (a_2, b_2)	Трапецеїдальний СТрап (a, b, β); $a = a_1 + a_2, b = b_1 + b_2,$ $\beta = (b_1 - a_1) - (b_2 - a_2) / (b - a)$	
Сума двох рівномірно розподілених величин з границями (a_1, b_1) і (a_2, b_2) та рівною шириною $(b_1 - a_1) = (b_2 - a_2)$	Трикутний $T(a, b)$; $a = a_1 + a_2,$ $b = b_1 + b_2$	
Гармонічне коливання між нижньою (a) та верхньою (b) границями	Арксинусний (U-подібний) $U(a, b)$	
Найкраща оцінка x та її стандартна невизначеність $u(x)$	Нормальний (Гаусів) $N[x, u^2(x)]$	
Найкраща оцінка x векторної величини та її відповідна матриця невизначеності U_x	Багатовимірний нормальний (Гаусів) $N(x, U_x)$	
Вибірка незалежних спостережень x_1, \dots, x_n з нормального розподілу з невідомими математичним сподіванням та дисперсією	t -розподіл (Стьюдента); $t_{n-1}(\bar{x}, s^2/n); \bar{x} = \sum_{q=1}^n x_q / n$ $s^2 = \sum_{q=1}^n (x_q - \bar{x})^2 / (n-1)$	
Найкраща оцінка x , розширена невизначеність U_p , коефіцієнт охоплення k_p , число ефективних степенів свободи ν_{eff}	t -розподіл (Стьюдента); $t_{\nu_{eff}}(x, (U_p / k_p)^2)$	
Найкраща оцінка x невід'ємної величини	Експонентний $Ex(1/x)$	
Число q підрахованих об'єктів у вибірці	Гамма-розподіл $G(q+1, 1)$	

1.4.3 Застосування методу ексцесів для отримання достовірних оцінок невизначеності вимірювань під час калібрувань ЗВТ

Надійна оцінка розширеної невизначеності не може бути отримана без урахування законів розподілу вхідних величин. Для завдань калібрування достовірну оцінку розширеної невизначеності можна отримати з урахуванням методу ексцесів [51]. Його застосування дозволяє отримати оцінки розширеної невизначеності, близькі до оцінок, отриманих методом МКМ.

Величинам X_i , які введені у вимірювання із зовнішніх джерел, таких як відкалібровані еталони, сертифіковані стандартні зразки і дані, зазначені в довідниках приписують значення і x_i стандартні невизначеності u_i на основі апріорної інформації, отриманої з цих джерел. Всім вхідним величинам апріорно приписують PDF, які характеризуються ексцесами η_i , значення яких наведено у табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Ексцеси законів розподілу вхідних величин

Закон розподілу	Значення ексцесу
Арксинусний	-1,5
Рівномірний	-1,2
Рівномірний з неточно заданими межами (β – відносне відхилення границь рівномірного розподілу)	$-1,2 \left[1 + \frac{3\beta^2(\beta^2 + 6)}{(\beta^2 + 3)^2} \right]$
Трапецеїдальний з параметром α_T	$-1,2(1 + \alpha_T^4) / (1 + \alpha_T^2)^2$
Трикутний	-0,6
Нормальний	0
Стюдента з числом ступенів свободи ν	$6/(\nu - 4)$

Розширена невизначеність вимірювань обчислюється цим методом за формулою:

$$U = k_p \cdot u(y), \quad (1.31)$$

де k_p – коефіцієнт охоплення, який для рівня довіри 0,95 розраховується за формулою [51]:

$$k_{0,95} = \begin{cases} 0,1085\eta^3 + 0,1\eta + 1,96, & \text{при } \eta < 0; \\ t_{0,95;(6/\eta+4)} \cdot \sqrt{\frac{3+\eta}{3+2\eta}}, & \text{при } \eta \geq 0, \end{cases} \quad (1.32)$$

а для рівня довіри 0,9545 – за формулою [11]:

$$k_{0,9545} = \begin{cases} 0,12\eta^3 + 0,1\eta + 2, & \text{при } \eta < 0; \\ t_{0,95;(6/\eta+4)} \cdot \sqrt{\frac{3+\eta}{3+2\eta}}, & \text{при } \eta \geq 0, \end{cases} \quad (1.33)$$

Слід зазначити, що при $\eta \geq 0$ з відхиленням не більше 2 % можна прийняти $k_{0,95} = 1,96$ та $k_{0,9545} = 2$.

У виразах (1.32-1.33) η – ексцес розподілу вимірюваної величини, який визначається за відсутності кореляції між результатами вимірювань вхідних величин як:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i c_i^4 u_i^4}{u^4(y)}, \quad (1.34)$$

причому η_i – ексцеси вхідних величин, взяті з табл. 1.6.

За наявності кореляції між результатами вимірювань k -ї та m -ї вхідних величин, ексцес розподілу вимірюваної величини слід обчислювати за формулою [80]:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1; i \neq k; i \neq m}^N \eta_i c_i^4 u_i^4 + \eta_{km} \left[c_k^2 u_k^2 + 2c_k c_m \text{cov}(x_k, x_m) + c_m^2 u_m^2 \right]^2}{u^4(y)}. \quad (1.35)$$

Метод ексцесів може бути застосований в тому випадку, якщо закони розподілу вхідних величин симетричні, модель вимірювання лінійна або може бути лінеаризованою, число багаторазових вимірювань вхідних величин не менше 6. Всі ці обмеження відповідають реальним умовам калібрування. Рекомендації щодо вибору кількості спостережень при реалізації методу ексцесів наведені в [81].

Висновки за розділом 1

У даному розділі проведено аналіз теоретичних засад процесу калібрування засобів вимірювань та відтворення значень електричного опору, а саме:

- наведено класифікацію засобів вимірювання та відтворення електричного опору;

- представлено основні етапи процесу калібрування відповідно до вимог стандарту ISO/IEC 17025:2017;

- проведено аналіз існуючих методів калібрування засобів вимірювання та відтворювання значень електричного опору;

- проведено аналіз методів оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні ЗВТ.

- розглянуто базовий алгоритм GUM та його недоліки, а також Доповнення GUM-S1, яке засноване на методі Монте-Карло. Показано, що застосування підходів, запропонованих в цих документа дають різні значення невизначеності навіть при лінійних модельних рівняннях і гаусовських розподілах вхідних величин.

Для усунення розбіжностей в оцінках невизначеностей за допомогою GUM та GUM-S1 пропонується використовувати метод ексцесу для побудови процедур калібрування засобів вимірювання та відтворювання значень електричного опору.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОЦЕДУР ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ МІР ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

В цьому розділі розглядаються наступні процедури калібрування МЕО: за допомогою еталонного омметра, шляхом звірення зі значенням еталонної МЕО за допомогою компаратора та шляхом непрямих вимірювань значення МЕО за допомогою потенціометра. Для всіх методів розроблено процедури оцінювання невизначеності вимірювань на основі методу ексцесів, розглянуті приклади їх реалізації та проведено порівняння отриманих результатів з результатами, які одержані за допомогою ММК.

2.1 Процедура оцінювання невизначеності прямих вимірювань значення міри опору, що калібрується за допомогою еталонного омметра

Ця процедура калібрування МЕО в метрологічній практиці зазвичай застосовується для калібрування багатозначних мір опорів (магазинів), яке виконується способом по-елементного або комплектного калібрування. Спосіб по-елементного калібрування полягає в роздільному визначенні опорів всіх ступеней декад магазину. Способом комплектного калібрування визначають дійсні значення опорів кожної декади при всіх показаннях (або найменших показаннях всіх інших декад).

Схема калібрування магазину опорів на постійному струмі, яка здійснюється шляхом прямого вимірювання еталонним омметром величини, що відтворюється магазином опорів, наведена на рис. 2.1.

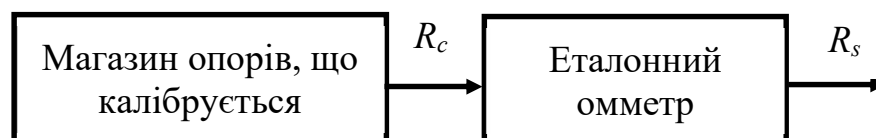


Рисунок 2.1 – Схема прямого вимірювання еталонним омметром величини, що відтворюється магазином опорів, який калібрується

Моделльне рівняння в цьому випадку має вигляд:

$$R_c = R_s + \varepsilon_s + R_0 \alpha \Delta_t \quad (2.1)$$

де R_c – величина, відтворювана магазином опорів; R_s – величина, що вимірюється еталонним омметром; ε_s – поправка на випадкову мінливість показань еталонного омметра; R_0 – номінальний опір магазину в точці, що калібрується; α – температурний коефіцієнт міри опору (магазину); Δ_t – поправка на похибку вимірювання температури міри.

Значення \bar{R}_s визначається за результатами багаторазових вимірювань R_{sq} еталонним омметром:

$$\bar{R}_s = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n R_{sq} \quad (2.2)$$

Поправці на випадкову мінливість показань еталонного омметра ε_s приписується нормальний закон розподілу з нульовим математичним очікуванням. Поправці на похибку вимірювання температури міри $\hat{\Delta}_t$ приписується рівномірний закон розподілу з нульовим математичним очікуванням. Тому вимірне значення опору магазину буде дорівнювати:

$$\hat{R}_c = \bar{R}_s \quad (2.3)$$

Стандартна невизначеність вимірювань при калібруванні магазину визначається за формулою:

$$u(\hat{R}_c) = \sqrt{u^2(\hat{R}_s) + u^2(\bar{\varepsilon}_s) + R_0^2 \alpha^2 u^2(\hat{\Delta}_t)}, \quad (2.4)$$

де $u(\hat{R}_s)$ – стандартна невизначеність вимірювання опору омметром, яка виражається через розширену інструментальну невизначеність омметра U_s у припущенні нормального закону розподілу (коефіцієнт охоплення $k_s = 2$), за формулою:

$$u(\hat{R}_s) = \frac{U_s}{k_s}; \quad (2.5)$$

$u(\bar{\varepsilon}_s)$ – стандартна невизначеність випадкової мінливості показань еталонного омметра дорівнює [51]:

$$u(\bar{\varepsilon}_s) = \frac{s(\varepsilon_{si})}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{n-1}{n-3}}, \quad (2.6)$$

причому середньоквадратичне відхилення випадкової мінливості показань еталонного омметра $s(\varepsilon_{si})$ знаходять за формулою:

$$s(\varepsilon_{si}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (\varepsilon_{sq} - \bar{\varepsilon}_s)^2}; \quad (2.7)$$

$u^2(\hat{\Delta}_t)$ – стандартна невизначеність вимірювання температури міри, виражена через її границі $\pm\theta_t$, у припущенні рівномірного закону розподілу Δ_t в середині цих границь наступним чином:

$$u(\hat{\Delta}_t) = \frac{\theta_t}{\sqrt{3}}. \quad (2.8)$$

Розширену невизначеність у відповідності з [82] будемо обчислювати методом ексцесів [83], для забезпечення сумісність отримуваних результатів з результатами, які одержують за допомогою ММК.

Метод ексцесів [83] передбачає обчислення розширеної невизначеності за формулою:

$$U(\hat{R}_c) = k(\eta)u(\hat{R}_c), \quad (2.9)$$

де $k(\eta)$ – коефіцієнт охоплення, який залежить від ексцесу η розподілу вимірюваної величини.

Для рівня довіри 0,95:

$$k_{0,95} = \begin{cases} 0,1085\eta^3 + 0,1\eta + 1,96, & \text{при } \eta < 0; \\ t_{0,95;(6/\eta+4)} \cdot \sqrt{\frac{3+\eta}{3+2\eta}}, & \text{при } \eta \geq 0, \end{cases} \quad (2.10)$$

де ексцес вимірюваної величини обчислюється за формулою

$$\eta = \frac{\eta_s u^4(\hat{R}_s) + \eta_\varepsilon u^4(\bar{\varepsilon}_s) + \eta_t R_0^4 \alpha^4 u^4(\hat{\Delta}_t)}{u^4(\hat{R}_c)}, \quad (2.11)$$

в якій ексцеси вхідних величин беруться у відповідності з їх законами розподілу і дорівнюють, відповідно, $\eta_s = 0$; $\eta_\varepsilon = \frac{6}{n-5}$; $\eta_t = -1,2$.

Бюджет невизначеності для цього випадку наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Бюджет невизначеності вимірювання при калібруванні магазину опорів при реалізації метода ексцесів

Вхідна величина	Значення вхідної величини	Стандартна невизначеність вхідної величини	Ексцес вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внески невизначеності
R_s	\bar{R}_s	$u(\hat{R}_s)$	η_s	1	$u(\hat{R}_s)$
ε_s	0	$u(\bar{\varepsilon}_s)$	η_ε	1	$u(\bar{\varepsilon}_s)$
Δ_t	0	$u(\hat{\Delta}_t)$	η_t	$R_0\alpha$	$\alpha R_0 u(\hat{\Delta}_t)$
Вимірювана величина	Значення вимірюваної величини	Стандартна невизначеність вимірюваної величини	Ексцес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
R_c	\hat{R}_c	$u(\hat{R}_c)$	η	$k(\eta)$	$U(\hat{R}_c)$

В якості експерименту, було проведено калібрування магазину опору типу P33 кл. 0,2 який має діапазон від 0,1 до 99999,9 Ом, за допомогою робочого еталону – цифрового мультиметра Fluke 8508A, використовуючи спосіб комплектного калібрування в точці 9 кОм. Температурний коефіцієнт опору міри опору, $\alpha = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Границі похибки вимірювання температури міри складають $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розширена невизначеність мультиметра в режимі вимірювання опору в цій точці складає $2,2 \cdot 10^{-5}$ кОм при коефіцієнті охоплення 2. Стандартна невизначеність вимірювання опору омметром обчислювалась за формулою (2.5) і склала $1,1 \cdot 10^{-5}$ кОм. Результати 6-разового вимірювання опору магазину в точці 9 кОм наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати вимірювання опору магазину, кОм

9,00075	9,00074	9,00073
9,00073	9,00074	9,00075

За формулою (2.2) обчислили оцінку результату вимірювання опору $\bar{R}_s = 9,00074$ кОм. Стандартна невизначеність варіації показань еталонного омметра $u(\bar{\varepsilon}_s)$, обчислена за формулами (2.6), (2.7), склала $4,714 \cdot 10^{-6}$ кОм. Ексцес варіації показань еталонного омметра для 6 вимірювань дорівнює 6. Стандартна невизначеність вимірювання температури міри, обчислена за формулою (2.8), дорівнює $u(\hat{\Delta}_t) = 0,2887$ °С.

Тому стандартна невизначеність вимірюваної величини, яка обчислювалось за формулою (2.5) дорівнює:

$$u(\hat{R}_c) = \sqrt{(1,1 \cdot 10^{-5})^2 + (4,714 \cdot 10^{-6})^2 + (2,6 \cdot 10^{-5})^2} = 2,863 \cdot 10^{-5} \text{ кОм},$$

а значення ексцеса вимірюваної величини, яке обчислювалось за формулою (2.11) склало:

$$\eta = \frac{0 \cdot (1,1 \cdot 10^{-5})^4 + 6 \cdot (4,714 \cdot 10^{-6})^4 - 1,2 \cdot (2,6 \cdot 10^{-5})^4}{(2,863 \cdot 10^{-5})^4} = -0,8129.$$

Цьому значенню ексцесу відповідає наступне значення коефіцієнта охоплення для рівня довіри 0,95, яке розраховано за формулою (2.10):

$$k_{0,95} = 0,1085 \cdot (-0,8129)^3 + 0,1 \cdot (-0,8129) + 1,96 = 1,79.$$

Бюджет невизначеності вимірювання при калібруванні магазину опорів при реалізації метода ексцесів наведений в табл. 2.3

Таблиця 2.3

Бюджет невизначеності вимірювання при калібруванні магазину опорів Р33

Вхідна величина	Значення вхідної величини	Стандартна невизначеність вхідної величини	Ексцес вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внески невизначеності, кОм
R_s	9,00074 кОм	0,000011 кОм	0	1	0,000011
ε_s	0 кОм	$4,714 \cdot 10^{-6}$ кОм	6	1	$4,714 \cdot 10^{-6}$
Δ_t	0 °С	0,289 °С	-1,2	0,00009 кОм/К	0,00002601
Вимірювана величина	Значення вимірюваної величини	Стандартна невизначеність вимірюваної величини, кОм	Ексцес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність, кОм
R_c	9,00074 кОм	0,00002863	-0,813	1,79	0,0000512

За результатами табл. 2.3 було проведено моделювання методом Монте-Карло розглянутих вимірювань за допомогою програми [84], в результаті якого отримані наступні результати: $\hat{R}_c = 9,00074$ кОм; $u(\hat{R}_c) = 0,0000286$ кОм; $k=1,8$; $U = 0,00005$ кОм (рис. 2.2). Таким чином, відносне відхилення отриманої оцінки розширеної невизначеності від результатів, отриманих методом ексцесу не перевищує -2,4 %.

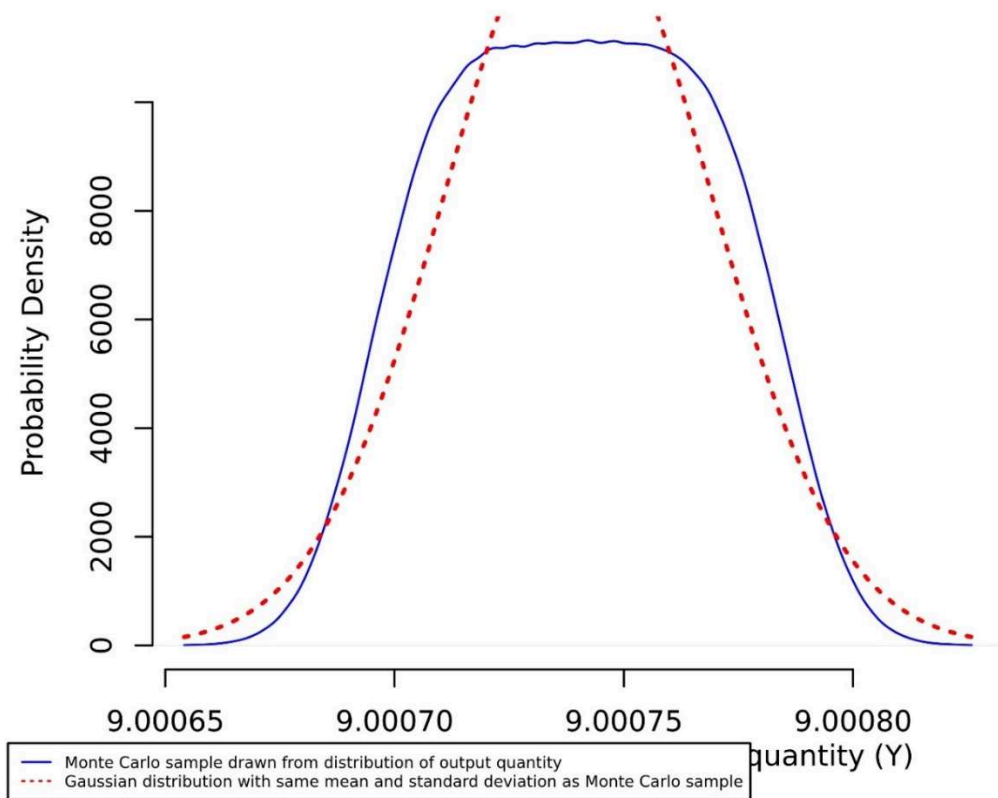


Рисунок 2.2 – Результати моделювання методом Монте-Карло

2.2 Процедура оцінювання невизначеності при звірненні значення міри опору, що калібрується зі значенням еталонної міри опору за допомогою компаратора

Звірення значення МЕО, що калібрується зі значенням еталонної МЕО є найпоширенішим методом калібрування однозначних МЕО. Схема калібрування, яка відповідає цьому випадку наведена на рис. 2.3 [7].

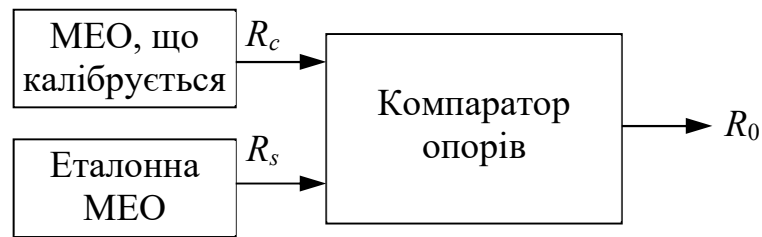


Рисунок 2.3 – Схема зв'язування каліброваної та еталонної МЕО за допомогою компаратора

Значення опору міри, яка калібрується R_c , що отримується в результаті калібрування, одержують на підставі моделі (рівняння) вимірювання [48]:

$$R_c = (R_s + \Delta_s) + (R_0 + \Delta_0), \quad (2.12)$$

де R_s – опір еталонної міри; Δ_s – поправка на нестабільність еталонної міри протягом міжкалібрувального інтервалу; R_0 – значення, яке індикується компаратором; Δ_0 – поправка на температурну похибку компаратора.

Значення опору еталонної міри \hat{R}_s беруть з її сертифіката калібрування. Значення \bar{R}_0 визначається за результатами n показань компаратора δ_{0i} , %:

$$\bar{R}_0 = \frac{\hat{R}_s}{n \cdot 100} \sum_{q=1}^n \delta_{0q}. \quad (2.13)$$

Поправки Δ_s , Δ_0 є центрованими величинами, тому їх оцінки $\hat{\Delta}_s$, $\hat{\Delta}_0$ дорівнюють нулю.

Значення вимірюваної величини \hat{R}_c знаходять при підстановці в (2.12) оцінок вхідних величин:

$$\hat{R}_c = \hat{R}_s + \bar{R}_0. \quad (2.14)$$

Стандартна невизначеність вимірюваної величини $u(\hat{R}_c)$ буде визначатися через стандартні невизначеності вхідних величин, які входять в (2.12), виходячи з виразу:

$$u(\hat{R}_c) = \sqrt{u_B^2(\hat{R}_s) + u_B^2(\hat{\Delta}_s) + u_A^2(\bar{R}_0) + u_B^2(\hat{R}_0) + u_B^2(\hat{\Delta}_0)}, \quad (2.15)$$

де $u^2(\hat{R}_s)$ – стандартна невизначеність типу B еталонної МЕО, яка розраховується через значення розширеної невизначеності $U(\hat{R}_s)$, та коефіцієнт охоплення k_s , взяті з її сертифіката калібрування:

$$u(\hat{R}_s) = U(\hat{R}_s)/k_s; \quad (2.16)$$

$u_B(\hat{\Delta}_s)$ – стандартна невизначеність типу B , яка обумовлена нестабільністю еталонної міри протягом міжкалібрувального інтервалу; її знаходять через значення відносних границь цієї нестабільності δ_s у припущенні рівномірного розподілу нестабільності в середині границь:

$$u(\hat{\Delta}_s) = \delta_s \frac{\hat{R}_s}{\sqrt{3} \cdot 100}; \quad (2.17)$$

$u_A(\bar{R}_0)$ – стандартна невизначеність типу A , обумовлена мінливістю показів компаратора δ_{0i} :

$$u_A(\bar{R}_0) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{q=1}^n (\delta_{0q} \frac{\hat{R}_s}{100} - \bar{R}_0)^2}; \quad (2.18)$$

$u_B(\hat{R}_0)$ – стандартна невизначеність типу B , обумовлена поправкою на основну похибку компаратора, яка визначається з виразу для відносних границь цієї похибки γ_0 , взятих з технічного опису на компаратор у припущенні про рівномірний розподіл в середині границь:

$$u_B(\hat{R}_0) = \gamma_0 \frac{\bar{R}_0}{\sqrt{3} \cdot 100}; \quad (2.19)$$

$u_B(\hat{\Delta}_0)$ – стандартна невизначеність типу B , яка обумовлена поправкою на температурну похибку компаратора, що визначається через $u_B(\hat{R}_0)$ і відхилення температури навколишнього середовища $t_{\text{окр}}$ від $20\text{ }^\circ\text{C}$ за формулою:

$$u_B(\hat{\Delta}_0) = \frac{|t_{\text{окр}} - 20\text{ }^\circ\text{C}|}{10\text{ }^\circ\text{C}} u_B(\hat{R}_0), \quad (2.20)$$

Розширена невизначеність розраховується за формулою:

$$U(\hat{R}_c) = k \cdot u_c(\hat{R}_c), \quad (2.21)$$

де k – коефіцієнт охоплення, який визначається методом ексцесів для рівня довіри $p=0,9545$ за формулою [85]:

$$k = \begin{cases} 0,12\eta^3 + 0,1\eta + 2, & \text{при } \eta < 0; \\ 2, & \text{при } \eta \geq 0. \end{cases} \quad (2.22)$$

Тут η – ексцес вимірюваної величини, який розраховується як:

$$\eta = \frac{\eta(R_s) \cdot u_B^4(\hat{R}_s) + \eta(\Delta_s) \cdot u_B^4(\hat{\Delta}_s) + \eta(\bar{R}_0) \cdot u_A^4(\bar{R}_0) + \eta(\hat{R}_0) \cdot u_B^4(\hat{R}_0) + \eta(\Delta_0) \cdot u_B^4(\hat{\Delta}_0)}{u_c^4(R_c)}, \quad (2.23)$$

де $u_i(y)$ та η_i внесок невизначеності i -ї вхідної величини в невизначеність вимірюваної величини та його ексцес, відповідно. Значення ексцесів вхідних величин для різних законів розподілу наведено в табл. 1.6 і дорівнюють $\eta(R_s) = 0$; $\eta(\Delta_s) = -1,2$; $\eta(\bar{R}_0) = 6/(n-5)$; $\eta(\hat{R}_0) = -1,2$; $\eta(\Delta_0) = -1,2$.

Бюджет невизначеності для цього випадку наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Бюджет невизначеності вимірювання при калібруванні МЕО за допомогою компаратора

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Ексцес вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внески невизначеності
R_s	\hat{R}_s	(2.16)	0	1	(2.16)
Δ_s	0	(2.17)	-1,2	1	(2.17)
R_0	(2.13)	(2.18)	$6/(n-5)$	1	(2.18)
		(2.19)	-1,2	1	(2.19)
Δ_0	0	(2.20)	-1,2	1	(2.20)
Вимірювана величина	Оцінка вимірюваної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ексцес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
R_c	(2.14)	(2.15)	(2.23)	(2.22)	(2.21)

В якості експерименту проведено калібрування МЕО типу P321 кл. 0,01

з опором 1 Ом методом звіряння з робочим еталоном P321 зі значенням опору 1,000020 Ом і розширеною невизначеністю 0,00001 Ом, взятими з сертифіката калібрування, за допомогою компаратора опорів P3015, при температурі навколишнього середовища 23 °С.

Показання компаратора δ_0 склали, % [48]:

$$0,00295; 0,00315; 0,00323; 0,00356; 0,00319; \\ 0,00282; 0,00298; 0,00304; 0,00298; 0,00295.$$

Значення \bar{R}_0 , розраховане за цими показаннями за формулою (2.13), склало 0,0000309 Ом, а його стандартна невизначеність типу A , розрахована за формулою (2.18) дорівнює $u_A(\bar{R}_0) = 0,00000066$ Ом.

Визначимо стандартну невизначеність типу B етalonної МЕО $u_B(\hat{R}_s)$ через її розширену невизначеність $U(\hat{R}_s) = 0,00001$ Ом і коефіцієнт охоплення $k_s = 2$ за формулою (2.16):

$$u_B(\hat{R}_s) = \frac{0,00001 \text{ Ом}}{2} = 0,000005 \text{ Ом.}$$

Стандартну невизначеність, обумовлену нестабільністю етalonної МЕО протягом міжкалібрувального інтервалу $u_B(\hat{\Delta}_s)$ знаходимо через значення відносних границь цієї нестабільності $\delta_n = 0,002$ % за формулою (2.17):

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = 0,002 \frac{1,00002}{\sqrt{3} \cdot 100} = 0,0000115 \text{ Ом.}$$

Стандартна невизначеність типу B , що обумовлена поправкою на основну похибку компаратора $u_B(R_0)$ визначається за формулою (2.19) через вираз для відносних для границь цієї похибки $\gamma_0 = 0,003 + 0,001 \cdot \bar{\delta}_0$, взятий з технічного опису на компаратор, в якому $\bar{\delta}_0 = 0,00309$ %. В цьому випадку $\gamma_0 = 0,003003$ % і $u_B(\hat{R}_0) = 0,0000173$ Ом.

Стандартна невизначеність типу B , що обумовлена поправкою на температурну НСП компаратора $u_B(\hat{\Delta}_0)$ буде визначатися через $u_B(\hat{R}_0)$ і відхилення температури навколишнього середовища 23 °С від 20 °С за

формулою (2.20):

$$u_B(\hat{\Delta}_0) = \frac{3}{10} 0,0000173 = 0,0000052 \text{ Ом.}$$

Бюджет невизначеності для цього випадку наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Бюджет невизначеності вимірювання при калібруванні МЕО Р321 за допомогою компаратора Р3015

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини, Ом	Стандартна невизначеність, Ом	Екссес вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внески невизначеності, Ом
R_s	1,00002	0,000005	0	1	0,000005
Δ_s	0	0,0000115	-1,2	1	0,0000115
R_0	0,0000309	0,00000066	1,2	1	0,00000066
		0,0000173	-1,2	1	0,0000173
Δ_0	0	0,0000052	-1,2	1	0,0000052
Вимірювана величина	Оцінка вимірюваної величини, Ом	Сумарна стандартна невизначеність, Ом	Екссес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність, Ом
R_c	1,0000509	0,000022	-0,555	1,92	0,0000423

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання опору МЕО, що калібрується, розрахована за формулою (2.13), буде дорівнювати 0,000022 Ом.

Екссес вимірюваної величини розраховуємо за формулою (2.23):

$$\eta = \frac{0 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^4 - 1,2 \cdot (1,15 \cdot 10^{-5})^4 + 1,2 \cdot (6,6 \cdot 10^{-7})^4 - 1,2 \cdot (1,73 \cdot 10^{-5})^4 - 1,2 \cdot (5,2 \cdot 10^{-5})^4}{(2,2 \cdot 10^{-5})^4} = -0,555.$$

Коефіцієнт охоплення, відповідний цьому екссесу для рівня довіри 0,9545 буде на підставі формули (2.22) дорівнювати:

$$k = 0,12 \cdot (-0,555)^3 + 0,1 \cdot (-0,555) + 2 = 1,92.$$

Розширена невизначеність, розрахована за формулою (2.21), склала:

$$U(\hat{R}_c) = 1,92 \cdot 0,000022 = 0,0000423 \text{ Ом.}$$

Проведено дослідження отриманих результатів методом Монте-Карло

[79]. Отримано значення оцінки вимірюваної величини $\widehat{R}_c = 1,0000509$ Ом, розширеної невизначеності $0,0000422$ Ом і коефіцієнта охоплення $1,91$ для рівня довіри $0,9545$. Таким чином, відносне відхилення отриманої оцінки розширеної невизначеності від результатів, отриманих методом ексцесу не перевищує $0,24$ %.

2.3 Процедура оцінювання невизначеності непрямих вимірювань значення міри електричного опору за допомогою потенціометра

Непряме вимірювання опору реалізується через вимірювання відношення падінь напруги на вимірюваному та зразковому резисторах. МЕО R_c , що калібрується та еталонну R_s МЕО підключають послідовно в ланцюг струму, який повинен бути стабільним протягом вимірювань та вимірюють падіння напруги на них V_c і V_s за допомогою компаратора напруг або потенціометра.

Рівняння вимірювань у цьому випадку має вигляд:

$$R_c = R_s \frac{V_c}{V_s}, \quad (2.24)$$

Величина опору еталонної МЕО визначається з поправками на нестабільність опору еталонної МЕО Δ_s за час, що минув з моменту її попереднього калібрування, і відхилення температури навколишнього середовища під час калібрування Δ_t .

В цьому випадку модель вимірювань прийме вигляд:

$$R_c = (R_s + \Delta_s + \alpha R_{nom} \Delta_t) \frac{V_c}{V_s}, \quad (2.25)$$

де $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ – температурний коефіцієнт опору еталонної МЕО; R_{nom} – номінальний опір МЕО.

В першому наближенні обчислення числового значення вимірюваної величини здійснюється за формулою:

$$\hat{R}_c = (\hat{R}_s + \hat{\Delta}_s + \alpha R_{nom} \hat{\Delta}_t) \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_s}, \quad (2.26)$$

у якій значення вхідних величин замінюється їх числовими значеннями, позначеними шапочками. У статті [86] наведено приклад калібрування однозначної МЕО Р331 з номінальним опором 1000 Ом з використанням еталонної однозначної МЕО зі значенням $\hat{R}_s = 1000,006$ Ом, розширеною невизначеністю $U_s = 0,01$ Ом та коефіцієнтом охоплення $k_s = 2$, зазначеними в його сертифікаті калібрування. У прикладі значення \hat{V}_s та \hat{V}_c склали 1 В и 1,000005 В, відповідно, а середнє значення всіх поправок: $\hat{\Delta}_s = \hat{\Delta}_t = 0$. В цьому випадку з (2.26) отримуємо $\hat{R}_c = 1000,011$ Ом.

Оскільки модель вимірювань (2.25) нелінійна, у загальному випадку потрібно оцінювати зміщення Δ_y числового значення у вимірюваної величини $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, враховуючи частинні похідні другого порядку вимірюваної величини за відповідними вхідними $c(x_i)_2$ [82]:

$$\Delta_y = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N c(x_i)_2 u^2(x_i), \quad (2.27),$$

де $u(x_i)$, $i=1,2, \dots, N$ – стандартні невизначеності вхідних величин X_1, X_2, \dots, X_N .

Для виразу (2.25) обчислення зміщення для \hat{R}_c виконується за формулою:

$$\Delta(\hat{R}_c) = -\frac{c(\hat{R}_s)_2 u^2(\hat{R}_s) + c(\hat{\Delta}_s)_2 u^2(\hat{\Delta}_s) + c(\hat{\Delta}_t)_2 u^2(\hat{\Delta}_t) + c(\hat{V}_c)_2 u^2(\hat{V}_c) + c(\hat{V}_s)_2 u^2(\hat{V}_s)}{2}. \quad (2.28)$$

Всі похідні $c(x_i)_2$ у виразі (2.28) дорівнюють нулю, за виключенням $c(V_s)_2 = 2R_s V_c / V_s^3 = 1999,992 A^{-1}$.

Тому, для наведених в [86] стандартних невизначеностей вхідних величин: $u(\hat{R}_s) = 0,005$ Ом; $u(\hat{\Delta}_s) = 0,01155$ Ом; $u(\hat{V}_c) = 5,8$ мкВ; $u(\hat{V}_s) = 5,8$ мкВ; $u(\hat{\Delta}_t) = 0,58$ °С, значення зміщення числового значення вимірюваної величини

буде дорівнювати:

$$\Delta(\hat{R}_c) = -\frac{1}{2}c(\hat{V}_s)_2 \cdot u^2(\hat{V}_s) = -R_c \left[\frac{u(\hat{V}_s)}{\hat{V}_s} \right]^2 = -1000,011 \left[\frac{5,8 \cdot 10^{-6}}{1} \right]^2 = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом.}$$

Отримане значення зміщення $\Delta(\hat{R}_c)$ можна враховувати в якості поправки до \hat{R}_c , отримуючи незміщену оцінку вимірюваної величини за формулою:

$$\hat{R}_{c0} = \hat{R}_c - \Delta(\hat{R}_c) = 1000,011 - 3,4 \cdot 10^{-8} = 1\ 000,010999966 \text{ Ом,} \quad (2.29)$$

однак, враховуючи зневажливо мале значення поправки, нею можна знехтувати.

У першому наближенні обчислення стандартної невизначеності вимірюваної величини здійснюється виходячи з виразу:

$$u(\hat{R}_c) = \sqrt{c^2(\hat{R}_s)u^2(\hat{R}_s) + c^2(\hat{\Delta}_s)u^2(\hat{\Delta}_s) + c^2(\hat{V}_c)u^2(\hat{V}_c) + c^2(\hat{V}_s)u^2(\hat{V}_s)}, \quad (2.30)$$

в якому $u(x_i)$ та $c(x_i)$ – стандартні невизначеності вхідної величини і частинні похідні вимірюваної величини за цією вхідною величиною (коефіцієнт чутливості), відповідно. Вирази для $c(x_i)$ та їх значення наведені у бюджетах невизначеності (табл. 2.6, 2.7).

Для наведених в [86] стандартних невизначеностей вхідних величин маємо $u(\hat{R}_c) = 0,0189 \text{ Ом.}$

Зміщення оцінки дисперсії вимірюваної величини обчислюється за формулою [82]:

$$\Delta(u^2) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N c^2(x_i)_2 \cdot [\eta(x_i) + 2] \cdot u^4(x_i) + \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} c^2(x_i, x_j) u^2(x_i) u^2(x_j), \quad (2.31)$$

де $\eta(x_i)$ – ексцес розподілу i -ї вхідної величини, $c(x_i, x_j)$ – змішана частинна похідна другого порядку вимірюваної величини по i -й та j -й вхідним величинам, яка оцінена для відомих значень вхідних величин.

Обчислення зміщення для $u(R_c)$ виконується (з урахуванням нульових значень других похідних) за формулою:

$$\begin{aligned} \Delta[u^2(\hat{R}_c)] = & \frac{1}{4}[c(\hat{V}_s)_2 u^2(\hat{V}_s)]^2 [\eta(V_s) + 2] + [c(\hat{R}_s, \hat{V}_s) u(\hat{R}_s) u(\hat{V}_s)]^2 + \\ & + [c(R_s, \hat{V}_c) u(\hat{R}_s) u(\hat{V}_c)]^2 + [c(\hat{\Delta}_s, \hat{V}_c) u(\hat{\Delta}_s) u(\hat{V}_c)]^2 + [c(\hat{\Delta}_s, \hat{V}_s) u(\hat{\Delta}_s) u(\hat{V}_c)]^2 + \\ & + [c(\hat{\Delta}_t, \hat{V}_c) u(\hat{\Delta}_t) u(\hat{V}_c)]^2 + [c(\hat{\Delta}_t, \hat{V}_s) u(\hat{\Delta}_t) u(\hat{V}_s)]^2 + [c(\hat{V}_c, \hat{V}_s) u(\hat{V}_c) u(\hat{V}_s)]^2, \end{aligned} \quad (2.32)$$

в якій $c(x_i, x_j)$ – змішані частинні похідні другого порядку вимірюваної величини за відповідними вхідними величинами; $\eta(x_i)$ – ексцеси вхідних величин.

Ненульові значення змішаних часткових похідних другого порядку дорівнюють:

$$\begin{aligned} c(\hat{R}_s, \hat{V}_c) = c(\hat{\Delta}_s, \hat{V}_c) = c(\hat{\Delta}_t, \hat{V}_c) &= 1/\hat{V}_s = 1\text{В}^{-1}; \\ c(\hat{R}_s, \hat{V}_s) = c(\hat{\Delta}_s, \hat{V}_s) = c(\hat{\Delta}_t, \hat{V}_s) &= \hat{V}_c/\hat{V}_s^2 = 1,000005\text{ В}^{-1}; \\ c(\hat{V}_c, \hat{V}_s) &= -\hat{R}_s/\hat{V}_s = -1000,6\text{ Ом/В}. \end{aligned}$$

Для наведених вище оцінок вхідних величин та їх стандартних невизначеностей, а також для ексцесів, які відповідають прийнятим законам розподілу вхідних величин $\eta(R_s) = 0$; $\eta(\Delta_s) = \eta(\Delta_t) = \eta(V_s) = \eta(V_c) = -1,2$, маємо $\Delta[u^2(\hat{R}_c)] = 2,2 \cdot 10^{-11}\text{ Ом}^2$.

Незміщену оцінку сумарної стандартної невизначеності знаходимо за формулою:

$$u_0(\hat{R}_c) = \sqrt{u^2(\hat{R}_c) + \Delta[u^2(\hat{R}_c)]}. \quad (2.33)$$

Для наведених вище значень $u^2(\hat{R}_c)$ та $\Delta[u^2(\hat{R}_c)]$, маємо $u_0(\hat{R}_c) = 0,0189$, що говорить про незначність зміщення стандартної невизначеності вимірюваної величини.

Оскільки зміщення вимірюваної величини відсутнє, це свідчить про те, що нелінійність моделі не вносить додаткову асиметрію до закону розподілу вимірюваної величини, тому для обчислення розширеної невизначеності можна застосувати метод ексцесів [82].

У цьому випадку ексцес вимірюваної величини обчислюється за формулою:

$$\eta(R_c) = \frac{1}{u^4(\hat{R}_c)} [\eta(\hat{R}_s)c^4(\hat{R}_s)u^4(\hat{R}_s) + \eta(\hat{\Delta}_s)c^4(\hat{\Delta}_s)u^4(\hat{\Delta}_s) + \eta(\hat{V}_c)c^4(\hat{V}_c)u^4(\hat{V}_c) + \eta(\hat{V}_s)c^4(\hat{V}_s)u^4(\hat{V}_s)]. \quad (2.34)$$

Для наведених вище оцінок вхідних величин, і стандартних невизначеностей, та їх ексцесів, маємо $\eta(R_c) = -0,35$.

Значення коефіцієнта охоплення для ймовірності 0,95 обчислюється за формулою (1.32):

$$k_{0,95} = 0,1085 \cdot (-0,35)^3 + 0,1 \cdot (-0,35) + 1,96 = 1,88. \quad (2.35)$$

У цьому випадку розширена невизначеність дорівнюватиме

$$U(\hat{R}_c) = k_{0,95}u(\hat{R}_c) = 0,0355 \text{ Ом}. \quad (2.36)$$

Бюджети невизначеності вимірювання, оціненої методом ексцесів при калібруванні МЕО за допомогою потенціометра наведено в табл. 2.6, 2.7.

Таблиця 2.6

Бюджет невизначеності вимірювання при калібруванні опору непрямим методом

Вхідні величини	Оцінки вхідних величин	Стандартні невизначеності	Ексцеси вхідних величин	Коефіцієнти чутливості	Внески невизначеності, Ом
R_s	\hat{R}_s	$u(\hat{R}_s)$	$\eta(R_s)$	\hat{V}_c/\hat{V}_s	$u(\hat{R}_s)\hat{V}_c/\hat{V}_s$
Δ_s	0	$u(\hat{\Delta}_s)$	$\eta(\Delta_s)$	\hat{V}_c/\hat{V}_s	$u(\hat{\Delta}_s)\hat{V}_c/\hat{V}_s$
Δ_t	0	$u(\hat{\Delta}_t)$	$\eta(\Delta_t)$	$\alpha\hat{R}_{nom}\hat{V}_c/\hat{V}_s$	$u(\hat{\Delta}_t)\alpha\hat{R}_{nom}\hat{V}_c/\hat{V}_s$
V_c	\hat{V}_c	$u(\hat{V}_c)$	$\eta(V_c)$	\hat{R}_s/\hat{V}_s	$u(\hat{V}_c)\hat{R}_s/\hat{V}_s$
V_s	\hat{V}_s	$u(\hat{V}_s)$	$\eta(V_s)$	$-\hat{R}_s\hat{V}_c/\hat{V}_s^2$	$-u(\hat{V}_s)\hat{R}_s\hat{V}_c/\hat{V}_s^2$
Вимірювана величина	Оцінка вимірюваної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ексцес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
R_c	(2.26)	(2.30)	(2.34)	(2.35)	(2.36)

Таблиця 2.7

Бюджет невизначеності вимірювання при калібруванні МЕО 1000 Ом
за допомогою потенціометра напруги

Вхідні величини	Оцінки вхідних величин	Стандартні невизначеності	Екцеси вхідних величин	Коефіцієнти чутливості	Внески невизначеності, Ом
R_s	1000,006 Ом	0,005 Ом	0	1,000005	0,005
Δ_s	0	0,0116 Ом	-1,2	1,000005	0,011547
Δ_t	0	0,577 °C	-1,2	0,02 Ом/°C	0,01154
V_c	1,000005 В	5,77 мкВ	-1,2	1000,006 Ом/В	0,00577
V_s	1 В	5,77 мкВ	-1,2	-1000,001 Ом/В	-0,00577
Вимірювана величина	Оцінка вимірюваної величини, Ом	Сумарна стандартна невизначеність, Ом	Екцес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність, Ом
R_c	1000,011	0,0189	-0,35	1,92	0,036

Зроблено оцінювання результату вимірювання прикладу [86] методом Монте-Карло: $\hat{R}_c = 1000,011$ Ом, $u(\hat{R}_c) = 0,0189$ Ом, $U(\hat{R}_c) = 0,037$ Ом, що показало хороший збіг з оцінкою, отриманою методом ексцесів.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано процедури оцінювання невизначеності на основі методу ексцесів при калібруванні МЕО різними методами, складено бюджети невизначеності, які можуть слугувати основою для створення програмних засобів для автоматизації оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні.

2. Представлено дослідження невизначеності вимірювань, яка оцінювалась при калібруванні магазину опорів Р33 за допомогою цифрового мультиметра Fluke 8508 А.

3. Розглянуто результати калібрування МЕО типу Р321 3-го розряду кл. 0,01 з опором 1 Ом за допомогою робочого еталона 2-го розряду та

компаратора опорів P3015, проведено оцінювання невизначеності вимірювань методом ексцесів.

4. Наведено приклад оцінювання невизначеності вимірювань методом ексцесів при калібруванні МЕО непрямым методом за допомогою потенціометра напруги P345 з урахуванням часової нестабільності еталонного опору, що минув з попереднього калібрування та змін температури навколишнього середовища. Проведено оцінювання можливого зсуву числового значення вимірюваної величини та її стандартної невизначеності з урахуванням нелінійності моделі вимірювань, показана їх несуттєвість.

5. Отримані в усіх розглянутих прикладах оцінки розширеної невизначеності методом ексцесів та методом Монте-Карло показали, що розбіжність між ними не перевищує $\pm 2,5\%$.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОЦЕДУР ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННЯ ОММЕТРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В цьому розділі розглядається процедура калібрування цифрових та аналогових омметрів постійного струму шляхом прямого вимірювання значення еталонної міри електричного опору, особливості калібрування не поліноміальної шкали омметра з урахуванням інструментальних невизначеностей вимірювальних приладів.

3.1 Процедура оцінювання невизначеності прямих вимірювань омметром, що калібрується еталонною міри електричного опору

У процесі здійснення калібрування здійснюється пряме вимірювання омметром, що калібрується, еталонної міри електричного опору [48]. Схему калібрування наведено на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема калібрування омметра на постійному струмі

Математична модель вимірювання у цьому випадку має вигляд:

$$\Delta = (R_c + \Delta_c) - (R_s + \Delta_s), \quad (3.1)$$

де Δ – систематична похибка омметра у точці калібрування; R_c – опір, виміряний омметром, що калібрується; Δ_c – поправка на дискретність відліку омметра, що калібрується; R_s – опір, що відтворюється еталонним резистором; Δ_s – поправка на дрейф значення опору МЕО з моменту її останнього калібрування.

Залежність опору еталонного резистора від температури калібрування омметра t_c визначається виразом:

$$R_s = R_{20}[1 + \alpha(t_c - 20) + \beta(t_c - 20)^2], \quad (3.2)$$

де R_{20} – опір еталонного резистора при температурі 20 °С; α та β – його температурні коефіцієнти опору.

З урахуванням цих параметрів, математична модель вимірювання матиме вигляд:

$$\Delta = (R_c + \Delta_c) - \{R_{20}[1 + \alpha(t_c - 20) + \beta(t_c - 20)^2] + \Delta_s\}. \quad (3.3)$$

Стандартна невизначеність поправки на роздільну здатність d омметра, що калібрується, оцінюється в припущенні її рівномірного розподілу всередині границь $\pm d/2$ як:

$$u_B(\hat{\Delta}_c) = \frac{d}{2\sqrt{3}}. \quad (3.4)$$

Стандартна невизначеність значення опору, що відтворюється еталонним резистором $u_B(\hat{R}_{20})$ знаходиться за значенням розширеної невизначеності U_{20} та коефіцієнта охоплення k_{20} , зазначених у сертифікаті його калібрування:

$$u_B(\hat{R}_{20}) = \frac{U_{20}}{k_{20}}. \quad (3.5)$$

Стандартна невизначеність, пов'язана з дрейфом Δ_s значення опору еталонного резистора з моменту його останнього калібрування, оцінюється у припущенні його рівномірного розподілу всередині границь $\pm \delta_s$ як:

$$u(\hat{\Delta}_s) = \frac{\delta_s \cdot R_{20}}{\sqrt{3} \cdot 100\%}, \quad (3.6)$$

де δ_s – допустима границя відносного відхилення опору еталонного резистора від значення, яке отримано при попередньому калібруванні.

Стандартна невизначеність, пов'язана з неточністю забезпечення заданої температури еталонного резистора, оцінюється у припущенні її рівномірного розподілу в границях $\pm \theta_t$ як:

$$u_B(\hat{t}_c) = \frac{\theta_t}{\sqrt{3}}. \quad (3.7)$$

Оскільки величини, що входять до рівняння (3.3), не кореловані, стандартна невизначеність вимірювання при калібруванні омметра розраховуватиметься за формулою:

$$u_c(\hat{\Delta}) = \sqrt{u_B^2(\hat{\Delta}_c) + c_{20}^2 u_B^2(\hat{R}_{20}) + u_B^2(\hat{\Delta}_s) + c_t^2 u_B^2(\hat{t}_c)}, \quad (3.8)$$

де c_{20} – коефіцієнт чутливості вимірюваної величини до зміни опору R_{20} :

$$c_{20} = \frac{\partial \Delta}{\partial R_{20}} = 1 + \alpha(t_c - 20) + \beta(t_c - 20)^2; \quad (3.9)$$

c_t – коефіцієнт чутливості вимірюваної величини до зміни температури калібрування t_c :

$$c_t = \frac{\partial \Delta}{\partial t_c} = -R_{20}[\alpha + 2\beta(t_c - 20)]. \quad (3.10)$$

Оскільки залежність (3.3) є нелінійною щодо t_c , значення $\hat{\Delta}$ та $u_c(\hat{\Delta})$, одержувані за допомогою виразів (3.3) і (3.8) необхідно обчислювати з поправками [82]:

$$\delta_t = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t_c^2} u^2(\hat{t}_c) = \beta R_{20} \frac{\theta_t^2}{3}; \quad (3.11)$$

$$\delta[u_c^2(\Delta)] = \frac{1}{4} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t_c^2} (\eta + 2) u^4(\hat{t}_c) = \beta^2 R_{20}^2 (\eta + 2) \frac{\theta_t^4}{9} = \delta_t^2 (\eta + 2), \quad (3.12)$$

де $\eta = -1, 2$ – ексцес розподілення температури t_c в границях $\pm\theta_t$.

Поправкою δ_t можна знехтувати, якщо виконується нерівність [85]:

$$\delta_t < \frac{1}{3} \sqrt{u_c^2(\hat{\Delta}) + \delta^2[u_c^2(\hat{\Delta})]} \quad (3.13)$$

Поправкою $\delta[u_c^2(\Delta)]$ можна знехтувати, якщо виконується нерівність [85]:

$$|\delta[u_c^2(\hat{\Delta})]| < \frac{1}{9} u_c^2(\hat{\Delta}). \quad (3.14)$$

Оскільки всі внески невизначеності, що входять у вираз (9), оцінені за типом B , для розрахунку розширеної невизначеності доцільно застосувати метод ексцесів [82, 85], який дозволяє отримати оцінку розширеної невизначеності з урахуванням законів розподілу вхідних величин.

З урахуванням того, що ексцес для нормального закону розподілу дорівнює нулю, а для рівномірного -1,2, ексцес вимірюваної величини дорівнюватиме:

$$\eta = -1,2 \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_c) + c_{20}^4 u_B^4(\hat{R}_{20}) + u_B^4(\hat{\Delta}_s) + c_t^4 u_B^4(\hat{t}_c)}{u_c^4(\hat{\Delta})}. \quad (3.15)$$

Тоді коефіцієнт охоплення для рівня довіри 0,9545, буде обчислюватися за формулою [82]:

$$k(\eta) = \begin{cases} 0,12\eta^3 + 0,1\eta + 2, & \text{при } \eta < 0; \\ 2, & \text{при } \eta \geq 0, \end{cases} \quad (3.16)$$

а розширену невизначеність знаходять як:

$$U = k(\eta) \cdot u_c(y), \quad (3.17)$$

де $u_c(y)$ – сумарна стандартна невизначеність (3.8).

Бюджет невизначеності буде мати вигляд, який представлений табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Бюджет невизначеності вимірювань при калібруванні омметра

Вхідні величини	Оцінки вхідних величин	Стандартні невизначеності	Ексцеси вхідних величин	Коефіцієнти чутливості	Внески невизначеності, Ом
R_c	\hat{R}_c	-	-	1	-
Δ_c	0	(3.4)	-1,2	1	$u_B(\Delta_c)$
R_{20}	\hat{R}_{20}	(3.5)	0	(3.9)	$-c_{20} u_B(\hat{R}_{20})$
Δ_s	0	(3.6)	-1,2	-1	$-u_B(\hat{\Delta}_s)$
t_c	\hat{t}_c	(3.7)	-1,2	(3.10)	$-c_t u_B(\hat{t}_c)$
Вимірювана величина	Оцінка вимірюваної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ексцес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
Δ	(3.3)	(3.8)	(3.15)	(3.16)	(3.17)

Приклад оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні цифрового омметра.

При температурі 20 °С проводиться калібрування цифрового омметра (ЦО) типу 2318 у точці 1 мОм за допомогою котушки електричного опору Р310 класом

точності 0,01 із сертифіката калібрування якого взято: дійсне значення взятє з сертифіката калібрування $\hat{R}_s = 0,9998$ мОм; розширена невизначеність відтворення опору котушкою P310 $U_s = 10^{-4}$ мОм, коефіцієнт охоплення 2 для рівня довіри 0,9545; температурні коефіцієнти опору $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = -0,39 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$. Дрейф опору котушки з моменту останнього калібрування δ_s – не більше 0,002 %; границі змін температури навколишнього середовища при калібруванні $\theta_t = \pm 2$ $^\circ\text{C}$. Показання ЦО під час перевірки складають $\hat{R}_c = 0,999$ мОм.

Для цих вихідних даних стандартна невизначеність поправки на роздільну здатність $d = 0,001$ мОм омметра, що калібрується, буде визначатися з виразу (3.4):

$$u_B(\Delta_c) = \frac{d}{2\sqrt{3}} = \frac{0,001}{2\sqrt{3}} = 2,89 \cdot 10^{-4} \text{ мОм}.$$

Стандартна невизначеність значення опору, що відтворюється еталонним резистором $u_B(\hat{R}_{20})$ знаходиться за формулою (3.5):

$$u_B(\hat{R}_{20}) = \frac{U_{20}}{k_{20}} = \frac{10^{-4}}{2} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ мОм}.$$

Стандартна невизначеність, яка пов'язана з дрейфом значення опору еталонного резистора з моменту його останнього калібрування $u(\Delta_d)$ оцінюється за формулою (3.6):

$$u(\Delta_s) = \frac{\delta_s \cdot R_{20}}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = \frac{0,002 \cdot 0,9998}{\sqrt{3} \cdot 100} = 1,154 \cdot 10^{-5} \text{ мОм}.$$

Стандартна невизначеність відтворення температури навколишнього середовища при калібруванні омметра $u_B(t_c)$ оцінюється за формулою (3.7):

$$u_B(t_c) = \frac{\theta_t}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,154 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Коефіцієнти чутливості c_{20} і c_t , що розраховуються за формулами (10) і (11), дорівнюватимуть:

$$c_{20} = \frac{\partial \Delta}{\partial R_{20}} = -[1 + \alpha(t_c - 20) + \beta(t_c - 20)^2] = -[1 + 4,6 \cdot 10^{-6}(20 - 20) - 0,39 \cdot 10^{-6}(20 - 20)^2] = -1;$$

$$c_t = \frac{\partial \Delta}{\partial t_c} = -R_{20}[\alpha + 2\beta(t_c - 20)] = -0,9998[4,6 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-6}(20 - 20)] =$$

$$= -4,6 \cdot 10^{-6} \text{ мОм}^0\text{С}.$$

Стандартна невизначеність вимірювання при калібруванні омметра, розрахована за формулою (3.8), становитиме:

$$u_c(\hat{\Delta}) = \sqrt{u_B^2(\hat{\Delta}_c) + c_{20}^2 u_B^2(\hat{R}_{20}) + u_B^2(\hat{\Delta}_s) + c_t^2 u_B^2(\hat{t}_c)} =$$

$$= \sqrt{(2,89 \cdot 10^{-4})^2 + (5 \cdot 10^{-5})^2 + (1,154 \cdot 10^{-5})^2 + (1,154 \cdot 4,6 \cdot 10^{-6})^2} = 2,93 \cdot 10^{-4} \text{ мОм}.$$

Експес вимірюваної величини, обчислений за формулою (3.15), дорівнюватиме:

$$\eta = -1,2 \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_c) + c_{20}^4 u_B^4(\hat{R}_{20}) + u_B^4(\hat{\Delta}_s) + c_t^4 u_B^4(\hat{t}_c)}{u_c^4(\hat{\Delta})} =$$

$$= \frac{(2,89 \cdot 10^{-4})^4 + (5 \cdot 10^{-5})^4 + (1,15 \cdot 10^{-5})^4 + (5,31 \cdot 10^{-6})^4}{(2,94 \cdot 10^{-4})^4} = -1,127.$$

Тоді коефіцієнт охоплення для рівня довіри 0,9545, обчислений за формулою (3.16), становитиме:

$$k(\eta) = 0,12\eta^3 + 0,1\eta + 2 = 0,12 \cdot (-1,127)^3 + 0,1 \cdot (-1,127) + 2 = 1,716,$$

а розширена невизначеність, розрахована за формулою (3.17), дорівнюватиме:

$$U = k(\eta) \cdot u_c(y) = 1,716 \cdot 2,93 \cdot 10^{-4} = 5,03 \cdot 10^{-4} \text{ мОм}.$$

Бюджет невизначеності вимірювань при калібруванні ЦО у точці 1 мОм наведено у табл. 3.2.

Для дослідження впливу нелінійності моделі вимірювання на оцінки числового значення вимірюваної величини та його сумарної стандартної невизначеності обчислювалися поправки до цих величин за формулами (3.11) та (3.13), відповідно:

$$\delta_t = \beta R_{20} \frac{\theta_t^2}{3} = -0,39 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9998 \frac{4}{3} = -0,52 \cdot 10^{-6} \text{ мОм};$$

$$\delta[u_c^2(\hat{\Delta})] = \delta_t^2 \cdot (\eta + 2) = (0,52 \cdot 10^{-6})^2 (-1,2 + 2) = 0,416 \cdot 10^{-12} \text{ мОм}^2.$$

Таблиця 3.2

Бюджет невизначеності вимірювань при калібруванні ЦО типу 2318 у точці
1 МОм

Вхідні величини	Оцінки вхідних величин	Стандартні невизначеності	Експеси вхідних величин	Коефіцієнти чутливості	Внески невизначеності, МОм
R_c	0,999 МОм	-	-	1	-
Δ_c	0 МОм	$2,89 \cdot 10^{-4}$ МОм	-1,2	1	$2,89 \cdot 10^{-4}$
R_{20}	0,9998 МОм	$5 \cdot 10^{-5}$ МОм	0	-1	$-5 \cdot 10^{-5}$
Δ_s	0 МОм	$1,154 \cdot 10^{-5}$ МОм	-1,2	-1	$-1,15 \cdot 10^{-5}$
t_c	20 °C	1,154 °C	-1,2	$-4,610^{-6}$ МОм/°C	$-5,31 \cdot 10^{-6}$
Вимірювана величина	Оцінка вимірюваної величини, МОм	Сумарна стандартна невизначеність, МОм	Експес вимірюваної величини	Коефіцієнт охоплення	Розширен а невизначеність, МОм
Δ	-0,0008	$2,933 \cdot 10^{-4}$	-1,127	1,716	0,000503

Корекція отриманого числового значення вимірюваної величини призводить до результату:

$$\hat{\Delta}_0 = -0,0008 + 0,52 \cdot 10^{-6} = -0,00079948 \text{ МОм.}$$

Корекція отриманого значення сумарної стандартної невизначеності призводить до результату:

$$u_{c0}(\hat{\Delta}) = \sqrt{u_c^2(\hat{\Delta}) + \delta^2[u_c^2(\hat{\Delta})]} = \sqrt{0,0002933^2 + 0,416 \cdot 10^{-12}} = 0,0002933 \text{ МОм}^2.$$

Використовуючи наведені в (3.13), (3.14) критерії знехтування до поправки, маємо:

$$|\delta_t| = 0,52 \cdot 10^{-6} < \frac{1}{3} \sqrt{u_c^2(\hat{\Delta}) + \delta^2[u_c^2(\hat{\Delta})]} = 0,98 \cdot 10^{-5},$$

$$|\delta[u_c^2(\hat{\Delta})]| = 0,416 \cdot 10^{-12} < \frac{1}{9} u_c^2(\hat{\Delta}) = 0,953 \cdot 10^{-11}.$$

Тобто поправками до числового значення вимірюваної величини та його сумарної стандартної невизначеності можна знехтувати.

Для верифікації одержаних результатів було проведено моделювання закону розподілу вимірюваної величини методом Монте-Карло [84]. Закон

розподілу вимірюваної величини подано на рис. 2. Були отримані такі параметри цього закону: математичне очікування $-0,0007996$ мОм та стандартне відхилення $0,0002932$ мОм. Значення розширених невизначеностей щодо різних рівнів довіри представлені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Розширені невизначеності вимірювання при калібруванні ЦО типу 2318 для різних рівнів довіри p

Рівень довіри p	Розширена невизначеність, мОм
0,99	0,0005475
0,95	0,0004915
0,9	0,0004555
0,68	0,0003415

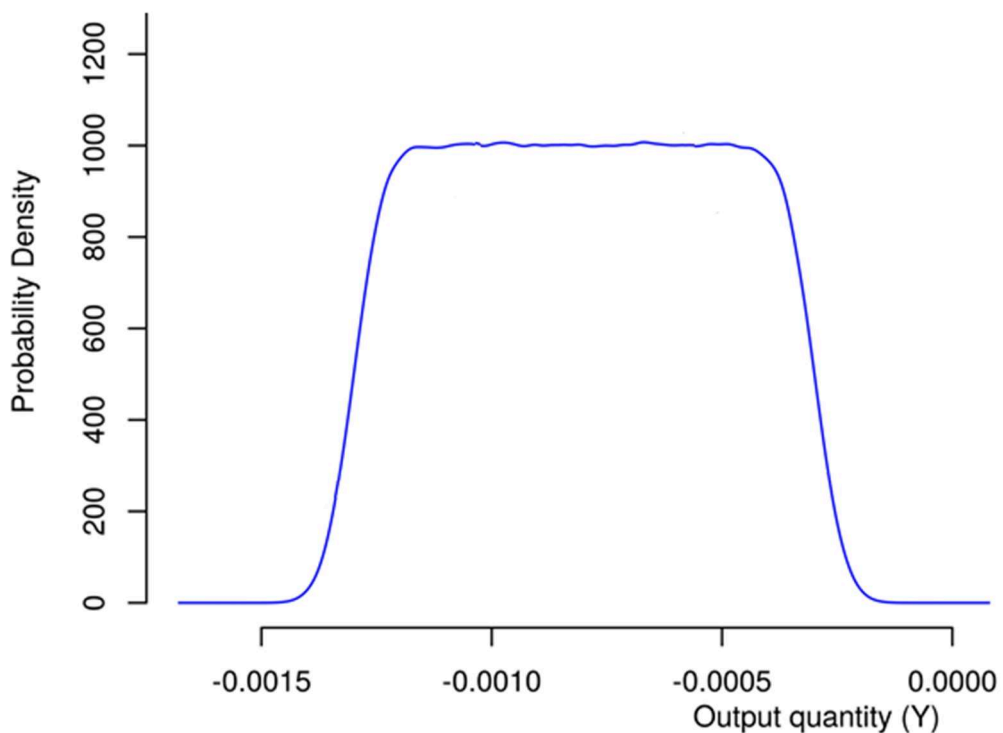


Рисунок 3.2 – Закон розподілу вимірюваної величини для калібрування ЦО типу 2318 у точці 1 мОм, отриманий методом Монте-Карло.

Для реалізації методу Монте-Карло застосовувався веб-додаток NIST Uncertainty Machine [84], який, на жаль, не розраховує розширену невизначеність для рівня довіри $p=0,9545$. Тому на підставі отриманих значень

розширеної невизначеності $U_{0,99}$, $U_{0,95}$ і $U_{0,9}$ (табл. 3.3) була розрахована квадратична апроксимуюча залежність виду $U_p = ap^2 + bp + c$.

Для цього було складено систему рівнянь:

$$\begin{cases} U_{0,99} = a \cdot 0,99^2 + b \cdot 0,99 + c; \\ U_{0,95} = a \cdot 0,95^2 + b \cdot 0,95 + c; \\ U_{0,9} = a \cdot 0,9^2 + b \cdot 0,9 + c. \end{cases}$$

Рішення цієї системи має вигляд: $a = (2,5 \cdot U_{0,99} - 4,5 \cdot U_{0,95} + 2 \cdot U_{0,9}) / 0,009$; $b = (U_{0,99} - U_{0,95} - a \cdot 0,0776) / 0,04$; $c = U_{0,95} - a \cdot 0,95^2 - b \cdot 0,95$.

Для наведених у табл. 3.2 значень розширених невизначеностей було отримано: $\hat{a} = 0,002381$; $\hat{b} = -0,00419$; $\hat{c} = 0,001916$.

Тому для рівня довіри $p = 0,9545$ будемо мати:

$$U_{0,9545} = \hat{a} \cdot 0,9545^2 + \hat{b} \cdot 0,9545 + \hat{c} = 0,0000835 \text{ мОм.}$$

Коефіцієнт охоплення цього випадку дорівнює:

$$k = \frac{U_{0,9545}}{u_c(\Delta)} = \frac{0,0000835}{0,0000430} = 1,94.$$

Отримані значення розширеної невизначеності та коефіцієнта охоплення збіглися зі значеннями, отриманими методом ексцесів.

3.2 Особливості калібрування аналогових омметрів з нелінійною шкалою

3.2.1 Оцінювання невизначеності вимірювань при калібрування аналогового омметра з нелінійною шкалою у фіксованій точці

Основною схемою калібрування омметрів є пряме вимірювання омметром, що калібрується, опору еталонної міри опору. При цьому передбачається два випадки вимірювання: використання багатозначної міри, що дозволяє встановлювати показання омметра на відмітку шкали, що

калібрується, і пряме вимірювання значення однозначної міри калібрується омметром (в діапазоні менше 10 Ом і більше 10^8 Ом).

Використання багатозначної міри опору

Поправка на похибку від установки омметра, що калібрується, на задану оцифровану позначку Δ_c включає в себе дві складові: поправку на похибку від паралаксу Δ_p , яка виникає, коли стрілка приладу розташована на деякій відстані від його шкали та візування стрілки оператором проводиться в напрямку не перпендикулярному поверхні шкали та поправка на неточність суміщення стрілки з оцифрованою відміткою Δ_n , пов'язаною з товщиною стрілки та штриха, нанесеного на шкалу.

Математичне сподівання цих поправок приймається рівним нулю $\hat{\Delta}_p = 0$; $\hat{\Delta}_n = 0$. Нижче наводиться оцінювання невизначеності цих поправок.

Невизначеність поправки на похибку від паралаксу

Якщо відстань від стрілки до шкали становить h , відстані від ока спостерігача до шкали приладу H , зміщення голови спостерігача від перпендикуляра до центру шкали рівноймовірне в межах $\pm D$, то межі похибки установки стрілки на оцифровану позначку $\pm\theta_p$ будуть визначатися виразом:

$$\theta_p = \frac{Dh}{HS}. \quad (3.18)$$

де $S = \Delta_l / \Delta_R$ – чутливість омметра у цій точці шкали, тобто довжина ділянки шкали у міліметрах Δ_l , що припадає на одиницю опору Δ_R поблизу точки калібрування.

Якщо шкала омметра рівномірна, то з огляду на те, що довжина всієї шкали омметра становить L , а значення границі вимірювання (кінця шкали) для вибраного діапазону – R_L , значення чутливості визначається як

$$S = L / R_L. \quad (3.19)$$

Якщо шкала омметра нерівномірна, значення чутливості буде:

$$S = \frac{LR_m}{(R + R_m)^2}, \quad (3.20)$$

де R_m – значення опору, що відповідає геометричній середині шкали на даному діапазоні вимірювань, R – значення опору, що відповідає точці калібрування.

У припущенні рівномірного розподілу похибки від паралаксу на інтервалі між її межами, стандартна невизначеність $u_B(\Delta_p)$ для рівномірної шкали дорівнюватиме [49, 87]:

$$u_B(\Delta_p) = \frac{DhR_L}{\sqrt{3HL}}, \quad (3.21)$$

а для нерівномірної визначатиметься виразом:

$$u_B(\Delta_p) = \frac{Dh(R + R_m)^2}{\sqrt{3HLR_m}}. \quad (3.22)$$

Стандартна невизначеність поправки на неспівпадіння стрілки з поділкою шкали, границі якої становлять $\pm d$, у припущенні рівномірного розподілу її в цьому діапазоні, дорівнюватиме [49, 87]:

$$u_B(\Delta_n) = \frac{d}{2\sqrt{3S}}, \quad (3.23)$$

або, з урахуванням виразів (3.19), (3.20), маємо:

$$u_B(\Delta_n) = \frac{dR_L}{2L\sqrt{3}} \quad (3.24)$$

для рівномірної шкали і

$$u_B(\Delta_n) = \frac{d(R + R_m)^2}{2LR_m\sqrt{3}}. \quad (3.25)$$

для нерівномірної.

Таким чином, сумарна стандартна невизначеність відліку при використанні багатозначної міри для рівномірної шкали дорівнюватиме:

$$u_B(\Delta_c) = \frac{R_L}{\sqrt{3} \cdot L} \sqrt{\left(\frac{Dh}{H}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (3.26)$$

а для нерівномірної:

$$u_B(\Delta_c) = \frac{(R+R_m)^2}{\sqrt{3LR_m}} \sqrt{\left(\frac{Dh}{H}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}. \quad (3.27)$$

При відстані від ока спостерігача до шкали приладу $H=250$ мм, зміщення голови D на ± 50 мм, та відстані між шкалою та стрілкою h від 0,5 до 1 мм, межі похибки від паралаксу θ_p можуть складати від $\pm 0,1$ до $\pm 0,2$ мм. Товщина стрілки d , як і товщина поділки шкали, також впливають на точність відліку, їх значення 0,05...0,1 мм дають складову похибки $d/2=0,025...0,05$ мм, що на порядок менше меж похибки від паралаксу.

У цьому випадку сумарна стандартна невизначеність відліку при використанні багатозначної міри для омметра В7-15 з довжиною шкали 68 мм на межі 10 Ом (значення опору, що відповідає геометричній середині шкали на даному діапазоні вимірювань $R_m=1$ Ом) буде в залежності від значення опору, що відповідає точці калібрування R буде змінюватись так, як показано на рис. 3.3 і досягає значення 0,75 Ома в точці 20 Ом.

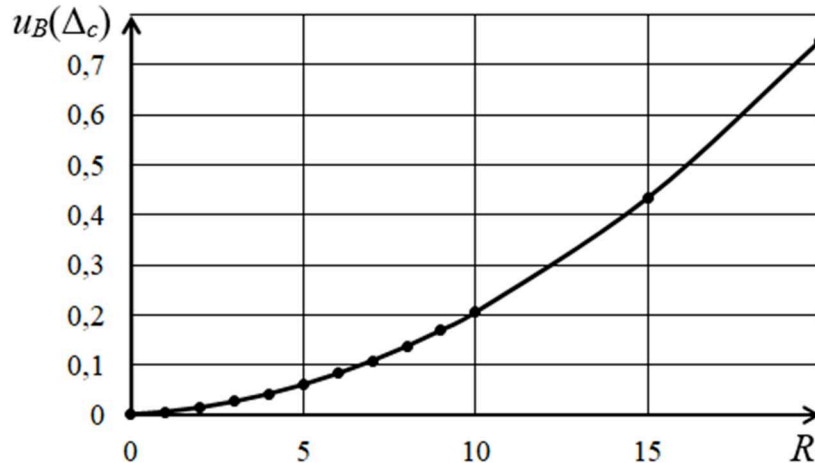


Рисунок 3.3 – Залежність стандартної невизначеності відліку омметра В7-15 на ганиці 10 Ом

Використання однозначної міри

У цьому випадку оцінка показань омметра, що калібрується, проводиться за положенням стрілки його індикатора, яка в загальному випадку знаходиться між відмітками шкали. У цьому випадку поправка на похибку

відліку, крім поправки, пов'язаної з паралаксом, буде включати поправку, пов'язану з інтерполяцією.

Тому необхідно оцінити вимірне значення опору омметром, що калібрується \hat{R}_c та оцінити невизначеність поправки на похибку інтерполяції.

Зазвичай на практиці під час потрапляння стрілки індикатора між двома відмітками шкали для підвищення точності відліку, ціна поділки R_g подумки ділиться на цілу кількість малих поділок q , яка приймається рівним двом, п'яти або десяти, залежно від довжини поділки, на яку потрапила стрілка приладу. Тоді для омметра з лінійною шкалою вимірне значення опору дорівнюватиме:

$$\hat{R}_c = R_q + m\hat{R}_g + n\hat{R}_g/q, \quad (3.28)$$

де m – кількість поділок від оцифрованої позначки R_q до поділки, на яку потрапила стрілка приладу; n – число малих поділок від початку поділки, на яку потрапила стрілка приладу до положення стрілки. Стандартна невизначеність відліку в цьому випадку, у припущенні про рівномірний розподіл між двома відмітками шкали, становить:

$$u_B(\Delta_r) = \frac{R_g}{2q\sqrt{3}}. \quad (3.29)$$

Для омметра з нелінійною шкалою необхідно знати залежність показання омметра \hat{R}_c від довжини шкали від її початку до точки відліку \hat{L}_c :

$$R_c = f(L_c). \quad (3.30)$$

У цьому випадку послідовність дій для визначення \hat{R}_c буде виглядати наступним чином:

1) Визначаємо значення меж поділки, на якому знаходиться \hat{R}_c : R_{\min} , R_{\max} та ціну цього поділки: $R_g = R_{\max} - R_{\min}$.

2) Використовуючи зворотню залежність $L_c = f(R_c)$ знаходимо ці значення у міліметрах: $L_{\min} = f(R_{\min})$, $L_{\max} = f(R_{\max})$, а також “геометричну” ціну поділки $L_g = L_{\max} - L_{\min}$.

3) Виконуючи подумки ділення L_g на q частин, знаходимо вимірне значення L_c в міліметрах як:

$$\hat{L}_c = L_{\min} + nL_g/q.$$

4) Використовуючи залежність (3.30) знаходимо вимірне значення \hat{R}_c в одиницях опору:

$$\hat{R}_c = f(\hat{L}_c).$$

5) Невизначеність інтерполяції буде, очевидно, дорівнювати:

$$u_B(\Delta_c) = \frac{R_g}{2q\sqrt{3}}.$$

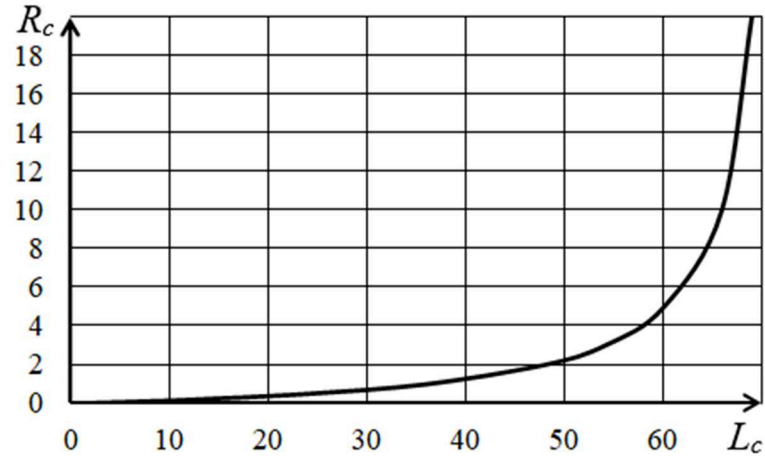
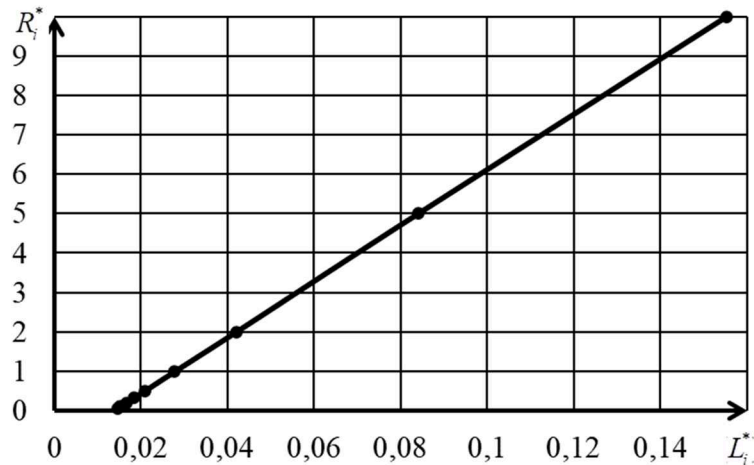
У статті [88] було визначено цю залежність для омметра В7-15 (рис. 3.4). Вона наведена у табл. 3.4. Нами була проведена її апроксимація виразом $R_c = \frac{L_c}{a + bL_c}$ з попередньою лінеаризацією методом заміни змінних $R_i^* = 1/R_i$, $L_i^* = 1/L_i$ [4]. Лінеаризована залежність $R_i^* = \psi(L_i^*)$ представлена на рис. 3.5. Методом найменших квадратів було отримано значення $a = 70,5$ мм/Ом і $b = -0,97$ Ом⁻¹. Похибка апроксимації $\delta_{i\text{appr}}$ не перевищує -2,7 % по всій довжині шкали.

Таблиця 3.4

Апроксимація залежності $R_c = f(L_c)$

R_i , Ом	L_i , мм	$1/R_i$, Ом ⁻¹	$1/L_i$, мм ⁻¹	$\hat{R}_{i\text{appr}}$, Ом	$\delta_{i\text{appr}}$, %
0,1	6,4368	10	0,15536	0,100	-0,17
0,2	11,905	5	0,08400	0,202	-0,97
0,5	23,833	2	0,04196	0,503	-0,60
1,0	35,982	1	0,02779	1,011	-1,08
2,0	48,033	0,5	0,02082	2,009	-0,45
3,0	54,180	0,33(3)	0,01846	3,019	-0,64
5,0	60,184	0,2	0,01662	4,965	0,70
10	66,050	0,1	0,01514	10,270	-2,70
20	69,098	0,05	0,01447	19,885	0,58

Зворотна залежність має вигляд $L_c = \frac{70,5 \cdot R_c}{1 + 0,97 \cdot R_c}$. В цьому випадку:

Рисунок 3.4 – Залежність $R_c = f(L_c)$ для омметра В7-15Рисунок 3.5 – Лінеаризована залежність $R_i^* = \psi(L_i^*)$

$$\begin{aligned}
 L_g &= L_{\max} - L_{\min} = 70,5 \frac{R_{c\max} (1 + 0,97 \cdot R_{c\min}) - R_{c\min} (1 + 0,97 \cdot R_{c\max})}{(1 + 0,97 \cdot R_{c\max})(1 + 0,97 \cdot R_{c\min})} = \\
 &= 70,5 \frac{R_{c\max} - R_{c\min}}{(1 + 0,97 \cdot R_{c\max})(1 + 0,97 \cdot R_{c\min})} \cdot \\
 \hat{L}_c &= \frac{70,5 \cdot R_{c\min}}{1 + 0,97 \cdot R_{c\min}} + 70,5 \cdot \frac{n}{q} \cdot \frac{R_{c\max} - R_{c\min}}{(1 + 0,97 \cdot R_{c\max})(1 + 0,97 \cdot R_{c\min})} = \\
 &= \frac{70,5}{1 + 0,97 \cdot R_{c\min}} \left[R_{c\min} + \frac{n}{q} \cdot \frac{R_g}{(1 + 0,97 \cdot R_{c\max})} \right].
 \end{aligned}$$

Після чого можна знайти вимірне значення \hat{R}_c в одиницях опору:

$$\hat{R}_c = \frac{\hat{L}_c}{70,5 - 0,97 \cdot \hat{L}_c}.$$

Тоді, на початку шкали, при $R_{\text{сmin}} = 0$,

$$\hat{L}_c = 70,5 \frac{n}{q} \cdot \frac{R_g}{(1 + 0,97 \cdot R_g)}; \quad \hat{R}_c = \frac{R_g \cdot n/q}{1 + 0,97 \cdot R_g (1 - n/q)}.$$

Залежності \hat{R}_c від n/q для різних R_g зображені на рис. 3.6. Відносна похибка інтерполяції (%), отримана без урахування запропонованих формул, наведена на рис. 3.7.

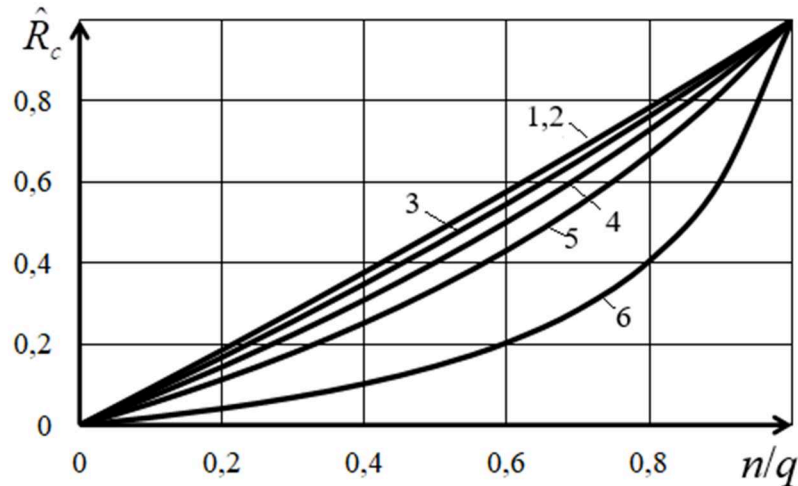


Рисунок 3.6 – Залежності \hat{R}_c від n/q для

1 – $R_g = 0,05$; 2 – $R_g = 0,1$; 3 – $R_g = 0,25$; 4 – $R_g = 0,5$; 5 – $R_g = 1,0$; 6 – $R_g = 5,0$.

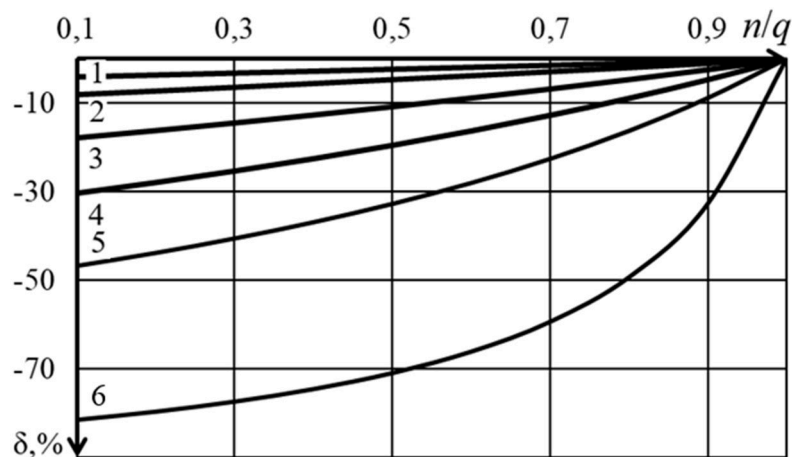


Рисунок 3.7 – Відносна похибка інтерполяції, отримана без урахування запропонованих формул для 1 – $R_g = 0,05$; 2 – $R_g = 0,1$; 3 – $R_g = 0,25$;

4 – $R_g = 0,5$; 5 – $R_g = 1,0$; 6 – $R_g = 5,0$.

Як видно з рис. 3.7 максимальне значення похибки інтерполяції, отримана без урахування запропонованих формул може досягати -81 %.

3.2.2 Ідентифікація не поліноміальної калібрувальної залежності з урахуванням інструментальних невизначеностей вимірювальних приладів електричного опору

Відгук вимірювального приладу (ВП) вимірюється в N точках калібрування розглянутого діапазону X_1, X_2, \dots, X_N для побудови калібрувальної залежності ВП. У кожній X_j точці калібрування проводять вимірювання показань ВП Y_{ji} ($i = 1, 2, \dots, n$) і повторюють їх n разів. За результатами вимірювань будують калібрувальну залежність і проводять її апроксимацію математичною залежністю. Знаходження параметрів (ідентифікація) залежності найчастіше виконується методом найменших квадратів (МНК) [89], який забезпечує найкращі результати, коли апроксимаційна залежність є поліномом.

У метрологічній практиці часто доводиться мати справу з випадком, коли збільшення ступеня полінома в розумних межах не призводить до істотного зменшення похибки апроксимації при виявленні нелінійної калібрувальної залежності. У цьому випадку відбувається перетворення вихідної залежності

$$Y = f(X, A, B) \quad (3.31)$$

в границях лінійної залежності

$$y = a + bx \quad (3.32)$$

шляхом заміни змінних [89]:

$$x = \Phi(X); \quad (3.33)$$

$$y = \Psi(Y). \quad (3.34)$$

Вирази (3.26) для нелінійних функцій (3.26), зведених до лінійних, наведено в першому стовпці таблиці 3.5, у другому стовпці якої містяться вирази (3.28), (3.29) для функцій.

Оцінки \hat{a}, \hat{b} параметрів лінеаризованої залежності в подальшому знаходять за допомогою МНК [90]. При оцінці невизначеності калібрувальної залежності (3.26) слід враховувати невизначеність значень вихідного сигналу

u_y ВП. Значення оцінюються як за типом A (через випадкові похибки ВП), так і за типом B (через інструментальні похибки вимірювань під час калібрування, а також невизначеність у визначенні значень (оцінених за типом B) u_x точок калібрування). Слід враховувати, що оскільки значення Y і X вимірюються безпосередньо за допомогою ВП, інструментальні невизначеності u_y і u_x повинні бути перераховані в інструментальні невизначеності u_y і u_x та при виявленні лінеаризованої залежності (3.27) так само, як:

$$u_x = \frac{\partial \Phi(X)}{\partial X} u_x = c_x u_x; \quad (3.35)$$

$$u_y = \frac{\partial \Psi(Y)}{\partial Y} u_y = c_y u_y. \quad (3.36)$$

Вирази для коефіцієнтів чутливості c_x і c_y для різних початкових залежностей (3.35), (3.36), наведені в п'ятому стовпці табл. 3.5.

Після виявлення лінійної залежності необхідно здійснити її обернене перетворення у вихідну, за яким необхідно буде розрахувати невизначеність знаходження значення X для будь якої величини Y . Значення коефіцієнтів \hat{A} і \hat{B} перераховані з отриманих коефіцієнтів наведені в таблиці 3.5. Вирази для коефіцієнтів чутливості $c_x = \frac{\partial X}{\partial x}$, що зв'язують невизначеності u_x і u_x для різних початкових залежностей (3.31), наведені у п'ятому стовпці таблиці 3.5. Вирази для коефіцієнтів чутливості, що зв'язують невизначеності,

$$u_x = c_x u_x \quad (3.37)$$

наведені в останньому стовпчику таблиці 3.5.

Загальна лінійна залежність має вигляд [90]:

$$y = a_0 + b(x - \bar{x}). \quad (3.38)$$

Використання залежності (3.38) замість (3.33) усуває кореляцію між оцінками \hat{a}_0 і \hat{b} [90]. Алгоритм оцінки невизначеності вимірювання для залежності буде складатися з наступних пунктів.

1) Відповідно до експериментальних точок $\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ji}$, залежність

$$\bar{Y}_j = f(X_j), \quad (3.39)$$

будують на графіку, який апроксимують однією з функцій $Y = f(X, A, B)$ першого стовпця таблиці 3.5.

2) Вихідну залежність (3.39) лінеаризують за допомогою виразів $x = \Phi(X)$ і $y = \Psi(Y)$ з другого стовпця таблиці 3.5.

3) Оцінки коефіцієнтів лінеаризованої залежності (3.32) a і b обчислюють за допомогою виразів [90]:

$$\hat{b} = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}. \quad (3.40)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j - \frac{\hat{b}}{N} \sum_{j=1}^N x_j = \frac{1}{Nn} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n y_{ji} - \hat{b} \bar{x}; \quad (3.41)$$

де

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j; \quad (3.42)$$

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}. \quad (3.43)$$

4) Відповідно до отриманих значень \hat{a} і \hat{b} , значення коефіцієнтів \hat{A} і \hat{B} розраховуються, використовуючи формули з третього стовпця таблиці 3.5, отримуючи модель вихідної залежності $Y = f(X, \hat{A}, \hat{B})$.

Оцінка невизначеності вимірювань за ідентифікованою залежністю:

1) Для заданого значення Y , значення X розраховується за відповідною формулою $X = f^{-1}(Y, \hat{A}, \hat{B})$ з четвертого стовпця таблиці 3.5.

2) Невизначеність знаходження значення x розраховується за формулами [90]:

$$u_{LSM}(x) = \sqrt{\left[\frac{1}{N} + (x - \bar{x})^2 / \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2 \right] \cdot [u^2(\bar{y}) + b^2 u_B^2(x)]}, \quad (3.44)$$

якщо x_j , $j = 1, \dots, N$ не є корельованими ($\text{cov}(x_j, x_k) = 0$ для будь-якого

$j, k = 1, \dots, N$ якщо $j \neq k$).

Якщо значення $x_j, j = 1, \dots, N$ є корельованими (посиленими тією самою постійною похибкою), стандартна невизначеність $u_{LSM}(x)$ обчислюється так:

$$u_{LSM}(x) = \sqrt{\left[\frac{1}{N} + (x - \bar{x})^2 / \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2 \right] \cdot u^2(\bar{y}) + b^2 u_B^2(x)}. \quad (3.45)$$

У цьому випадку значення $u(\bar{y})$ знаходять за формулою:

$$u(\bar{y}) = \sqrt{u_A^2(\bar{y}) + u_B^2(\bar{y})}, \quad (3.46)$$

де

$$u_B(\bar{y}) = c_Y u_B(Y); \quad (3.47)$$

$$u_A(x) = c_X u_A(X); \quad (3.48)$$

$$u_A(\bar{y}) = \sqrt{\frac{1}{(Nn-2)n} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \hat{a} - \hat{b}x_j)^2}, \quad (3.49)$$

Крім того, коефіцієнти чутливості c_X і c_Y розраховуються за формулами п'ятого стовпця табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Основні вирази для реалізації методу заміни змінної

$Y = f(X, A, B)$	$x = \Phi(X)$ $y = \Psi(Y)$	\hat{A}, \hat{B}	$X = f^{-1}(Y, \hat{A}, \hat{B})$	$c_X; c_Y$	c_x
$Y = Ae^{BX}$	$x = X$ $y = \ln Y$	$\hat{A} = e^{\hat{a}}$ $\hat{B} = \hat{b}$	$X = \frac{\ln Y - \ln \hat{A}}{\hat{B}}$	$c_X = 1$ $c_Y = 1/Y$	$c_x = 1$
$Y = AX^B$	$x = \ln(X)$ $y = \ln(Y)$	$\hat{A} = e^{\hat{a}}$ $\hat{B} = \hat{b}$	$X = \exp\left(\frac{\ln Y - \ln \hat{A}}{\hat{B}}\right)$	$c_X = 1/X$ $c_Y = 1/Y$	$c_x = e^x$
$Y = A + B \ln(X)$	$x = \ln(X)$ $y = Y$	$\hat{A} = \hat{a}$ $\hat{B} = \hat{b}$	$X = \exp\left(\frac{Y - \hat{A}}{\hat{B}}\right)$	$c_X = 1/X$ $c_Y = 1$	$c_x = e^x$
$Y = A + \frac{B}{X}$	$x = 1/X$ $y = Y$	$\hat{A} = \hat{a}$ $\hat{B} = \hat{b}$	$X = \frac{\hat{B}}{Y - \hat{A}}$	$c_X = -1/X^2$ $c_Y = 1$	$c_x = -1/x^2$
$Y = \frac{1}{A + BX}$	$x = X$ $y = 1/Y$	$\hat{A} = \hat{a}$ $\hat{B} = \hat{b}$	$X = \frac{1/Y - \hat{A}}{\hat{B}}$	$c_X = 1$ $c_Y = -1/Y^2$	$c_x = 1$
$Y = \frac{X}{A + BX}$	$x = 1/X$ $y = 1/Y$	$\hat{A} = \hat{b}$ $\hat{B} = \hat{a}$	$X = \frac{\hat{A}Y}{1 - \hat{B}Y}$	$c_X = -1/X^2$ $c_Y = -1/Y^2$	$c_x = -1/x^2$

3) Невизначеність $u_{LSM}(x)$ перераховується в невідомість $u_{LSM}(X)$ за формулою (3.32), використовуючи значення коефіцієнтів чутливості c_x з останнього стовпця таблиці 3.5.

Висновки до розділу 3

1. Уточнена модель вимірювання при калібруванні цифрового омметра забезпечує можливість проведення калібрування в діапазоні температур (15-30) °С для котушок класу 0,01 і (10-35) °С для котушок класу 0,02, оскільки включає залежність опору еталонного резистора від температури.

2. Оскільки уточнена модель вимірювання нелінійна, слід оцінювати усунення оцінки числового значення вимірюваної величини та її сумарної стандартної невідомості.

3. Оскільки всі вклади невідомості, що входять до моделі вимірювань, оцінені за типом B , для розрахунку розширеної невідомості доцільно застосувати метод ексцесів, який дозволяє отримати оцінку розширеної невідомості з урахуванням законів розподілу вхідних величин та автоматизувати процес її обчислення.

4. Наведено розрахунок оцінювання невідомості вимірювань на основі методу ексцесів при калібруванні цифрового омметра типу 2318 у точці 1 МОм за допомогою міри електричного опору Р310 класом точності 0,01. Для верифікації одержаних результатів було проведено моделювання закону розподілу вимірюваної величини методом Монте-Карло. Порівняння результатів оцінювання невідомості вимірювань методами ексцесів та Монте-Карло показало їх гарний збіг.

5. Для визначення розширеної невідомості веб-додатком NIST Uncertainty Machine для відсутнього рівня довіри 0,9545 слід скористатися отриманим у роботі алгоритмом.

6. Розглянуті особливості калібрування аналогових омметрів з лінійною та нелінійною шкалою. Досліджено дві схеми вимірювань при калібруванні: з

використанням багатозначної еталонної міри, яка дозволяє встановлювати покази омметра на відмітку шкали, що калібрується і пряме вимірювання значення опору еталонної однозначної міри омметром, що калібрується. Отримано вирази для оцінювання невизначеності поправок на всі складові похибки відліку для лінійної та нелінійної шкал омметра.

7. Запропоновано алгоритм оцінювання числового значення вимірюваного опору за нелінійною шкалою омметра. Виконана апроксимація нелінійної шкали омметра В7-15, на основі якої отримані формули, які дозволяють виконувати обчислення вимірюваного значення опору у випадку потрапляння стрілки омметра між відмітками його шкали. Розраховані похибки інтерполяції, які будуть отримані без урахування запропонованих формул і в такому випадку можуть досягати 81 %. Запропоновані математичні вирази для оцінювання сумарної стандартної невизначеності відліку при для обох схем калібрування.

8. Розроблено алгоритм ідентифікації неполіноміальних калібрувальних залежностей, що приводяться до лінійних залежностей методом заміни змінних. Параметри лінійних залежностей знаходять методом найменших квадратів. Наведено алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань при використанні ідентифікованої залежності з урахуванням інструментальних невизначеностей вимірювань відгуків вимірювального приладу, що калібрується, і значень калібрувальних точок.

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

4.1 Відтворення одиниці електричного опору за допомогою еталона Ома на квантовому ефекті Холла

У 1980 р. німецький фізик Клітцинг під час експериментів виявив, що холлівський опір при температурі, близькій до абсолютного нуля ($T \leq 1,5$ К), і сильному магнітному полі ($B > 3$ Тл) набуває дискретних значень. На залежності R_x від щільності електронів (рисунок 4.1), яка при звичайному ефекті Холла має монотонний характер, виникають серії плато, тобто має місце квантування опору [91-93].

Залежність R_x від магнітної індукції також набуває квантованого характеру (рисунок 4.2), а подовжній опір досягає нульового значення під час квантування холлівського опору (рисунок 4.2, нижня пікоподібна крива).

Було також виявлено, що значення холлівського опору на плато з високою точністю дорівнюють відношенню.

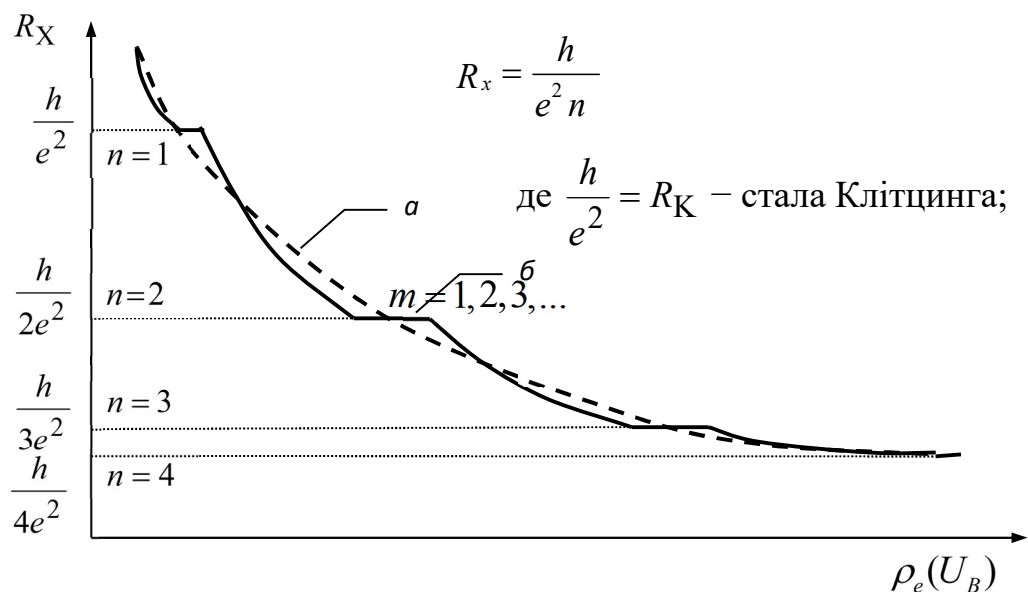


Рисунок 4.1 – Залежність холлівського опору від щільності електронів у каналі

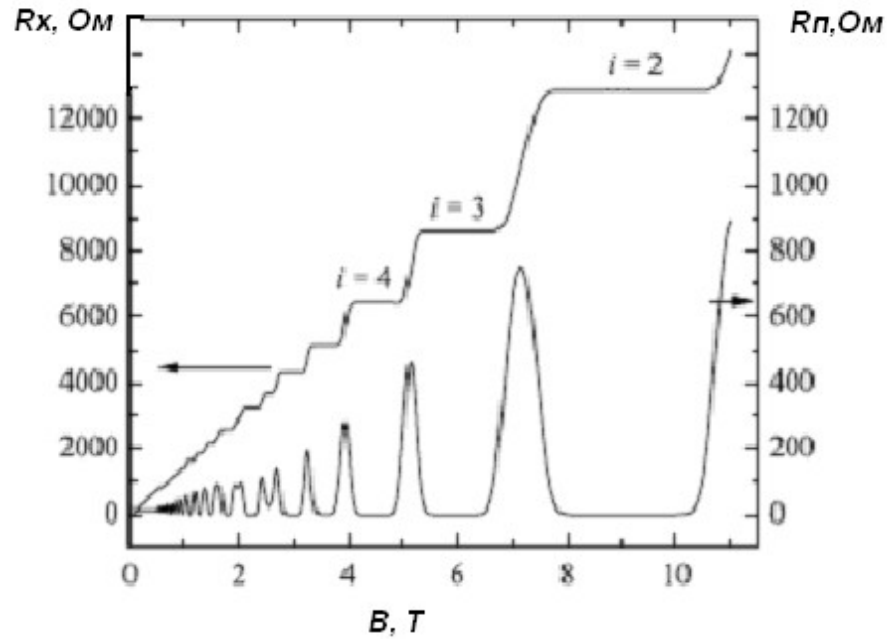


Рисунок 4.2 – Залежність холлівського і подовжнього опору від магнітної індукції

Ефект спостерігався в структурі типу метал–діелектрик–напівпровідник (МДН), яка являла собою масивний кристал напівпровідника (Si) з нанесеним на ньому шаром діелектрика (SiO_2), покритим металеву плівкою (рисунок 4.3).

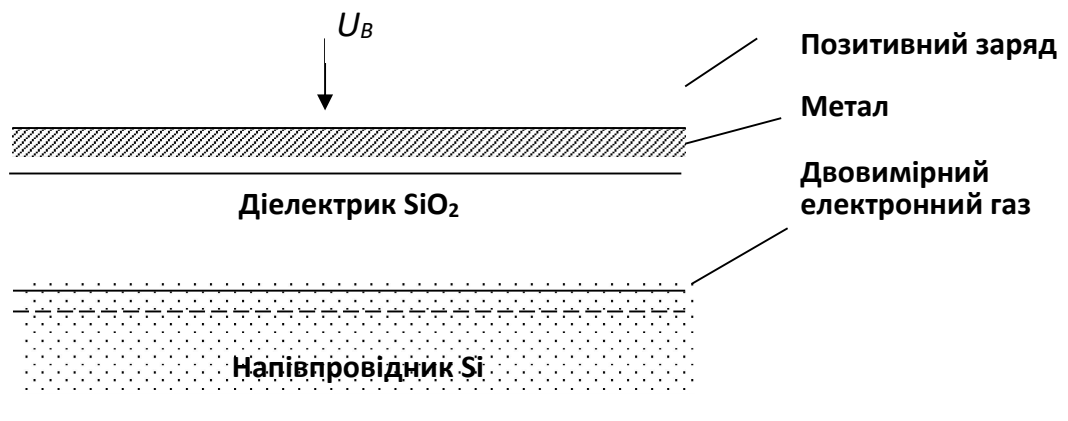


Рисунок 4.3 – Структура «метал – діелектрик – напівпровідник»

Квантовий ефект Холла (КЕХ) пояснюється наступним чином. Якщо товщина металевої плівки d надзвичайно мала і співрозмірна з міжатомною

відстанню, поступальний рух електронів вздовж однієї з осей, наприклад, Z , є неможливим, через що рух електронів є двовимірним в площині X – Y . Така структура одержала назву “двовимірної електронної системи”. Типовим прикладом такої системи, в якій спостерігається КЕХ, є наведена вище структура метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структура), створена парою метал-напівпровідник, розділеними тонким шаром діелектрика [95].

Така структура уявляє собою плоский конденсатор, обкладинками якого є метал і напівпровідник (рисунки 4.4, 4.5) При поданні напруги V_g між цими обкладинками в приповерхневій області напівпровідника виникає тонкий провідний електронний шар (інверсійний канал), що уявляє собою двовимірну електронну систему [96].

Відомо, що в разі локалізації електрона в обмеженій області простору, він, згідно до законів квантової механіки, може мати не які завгодно значення енергії, а лише ряд строго визначених дискретних значень.

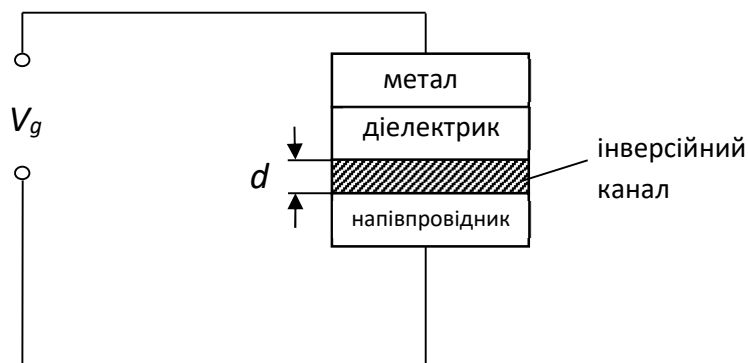


Рисунок 4.4 – Схема двовимірної структури

У випадку малої товщини d рух електронів має локалізований характер. Крім того, завдяки наявності магнітного поля, рух електронів в площині X – Y буде проходити за циклотронною орбітою, що має форму кола, і буде обмежений радіусом цього кола, а рух електронів вздовж осі Z буде обмеженим малою товщиною d двовимірного шару.

Таким чином, рух електрона буде локалізовано в обмеженій області за всіма трьома координатами X , Y , Z , що веде до появи дискретизації його енергетичного спектра (квантування).

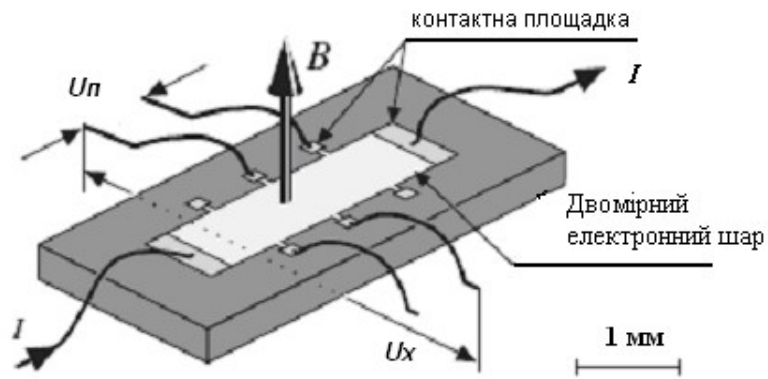


Рисунок 4.5 – Холлівська двовимірна структура

Це відкрило можливість використання квантованого холлівського опору, “прив’язаного” до значення $\frac{h}{e^2}$, як еталона опору.

З практичних міркувань номер плато (сходинки) вибирається парним (2 чи 4), тоді холлівський опір відповідно становить $(R_x)_{n=2} = \frac{h}{2e^2} = 12906,4035$ Ом, або $(R_x)_{n=4} = 6453,20175$ Ом [94].

4.1.1 Апаратне рішення еталона (рис. 4.6)

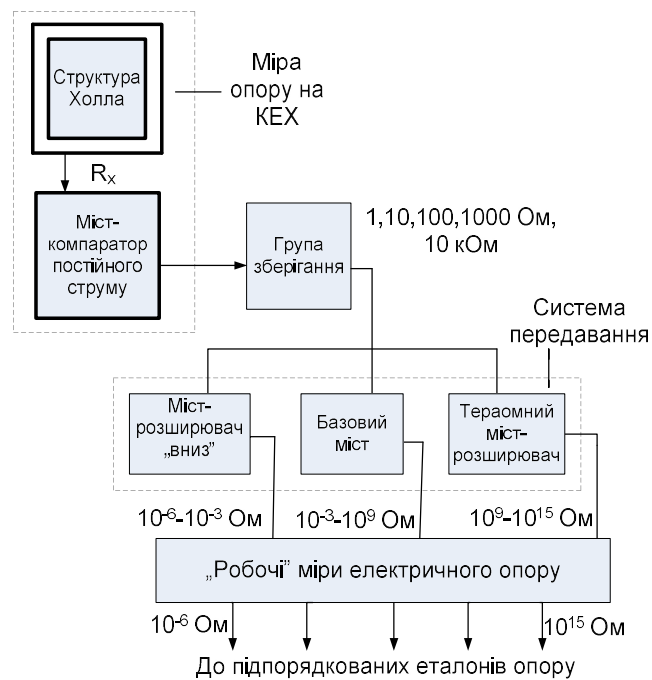


Рисунок 4.6 – Спрощена функціональна схема національного еталона

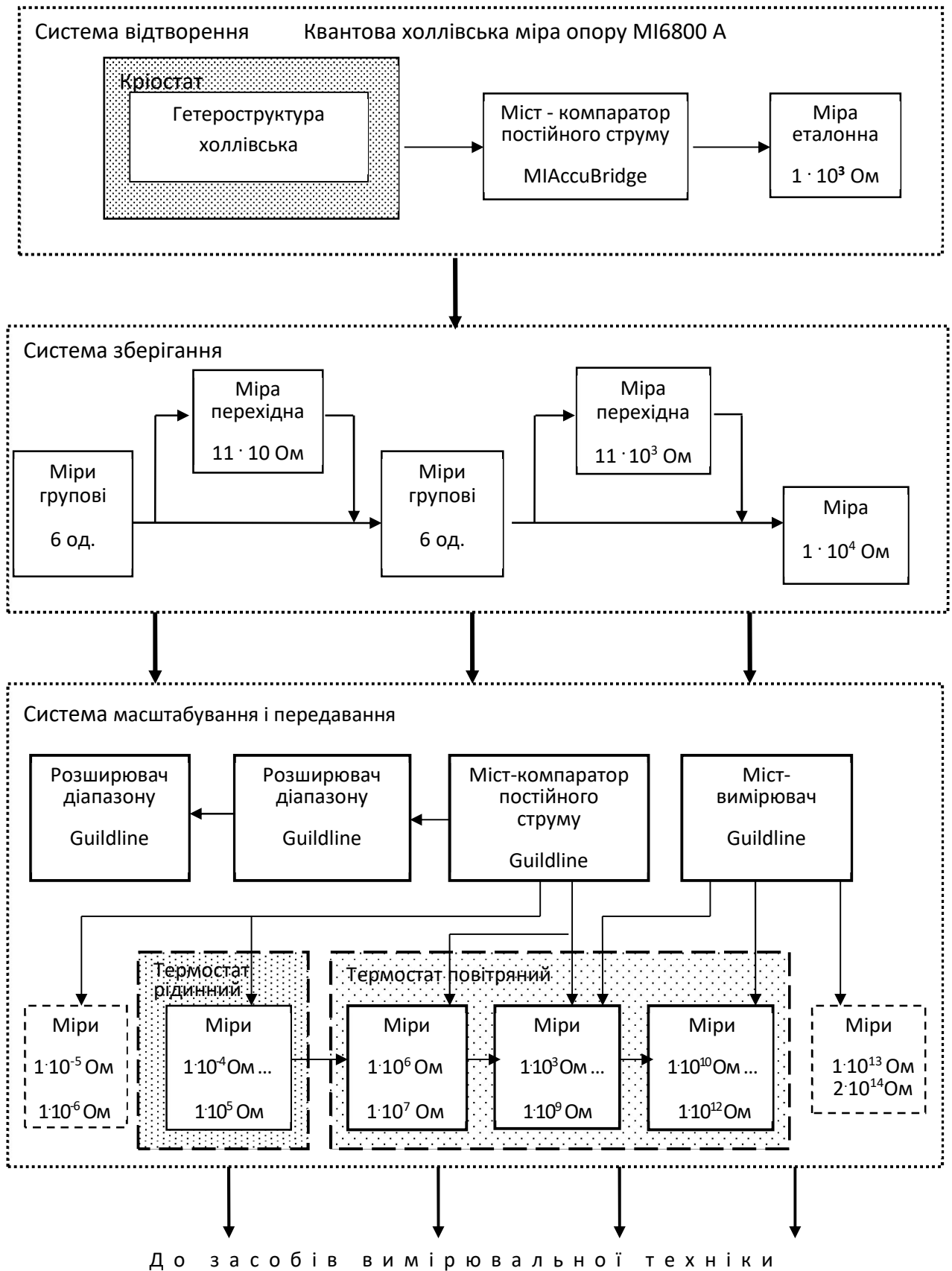


Рисунок 4.7– Структура національного первинного еталону опору

4.1.2 Міра електричного опору на КЕХ

Міра опору на КЕХ – це установка, яка включає необхідні пристрої для відтворення квантового ефекту Холла, вона містить у собі кріостат (герметизована ємність з рідким гелієм – посудина Дюара), у якому в спеціальному кріозонді знаходиться холлівська структура, надпровідний соленоїд, що створює магнітне поле, а також пристрій для передачі розміру холлівського опору до класичної міри опору (рисунок 4.8).

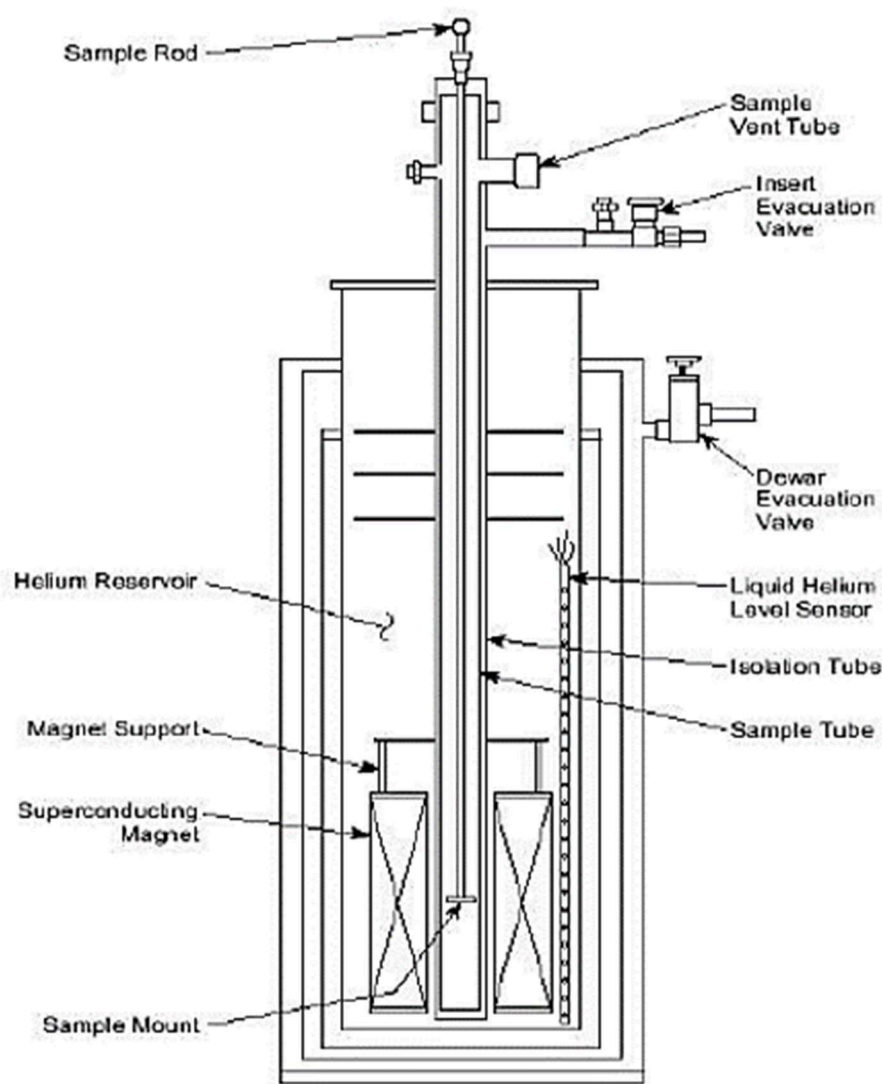


Рисунок 4.8 – Схема кріостата з надпровідним магнітом і зондом

Передача опору від холлівської міри має ряд особливостей, порівняно з вимірюванням опору звичайної міри. Головна з них полягає в тому, що, на

відміну від звичайних мір опору, перехідний опір між струмовими і потенційними клемми зразка в режимі квантового ефекту Холла не малий і завжди близький до номінального значення відтворюваного опору. З цієї причини неможливе проведення вимірювань з використанням подвійних мостів опору, які широко застосовуються в складі національних еталонів.

Тому в даному випадку використовуються струмові мости з індуктивним компаратором постійних струмів (рисунок 4.9).

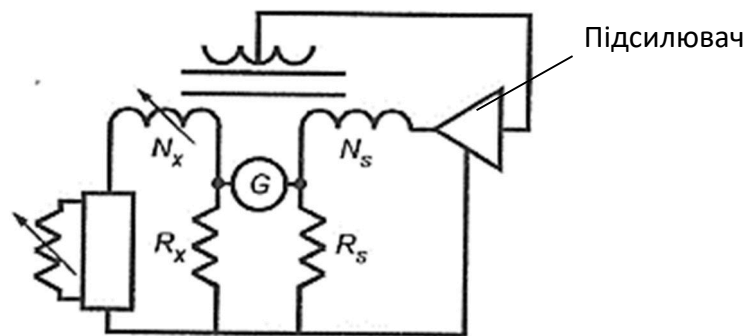


Рисунок 4.9 – Схема моста з компаратором постійного струму

Компаратор струмів являє собою пристрій, який порівнює струми, що течуть у плечах моста, і підтримує задане певне відношення між ними. Порівнювані міри з опорами R_x та R_s вмикаються в плечі моста, а струми, що течуть через них, проходять також і через індуктивно пов'язані котушки з кількостями витків N_s і N_x відповідно, магнітні поля яких спрямовані назустріч один одному. За допомогою датчика магнітного поля і підсилювача зворотного зв'язку, що регулює струм в одному з плечей моста, сумарне значення магнітного поля котушок підтримується рівним нулю [97, 98].

В даний час в еталонних установках на основі квантового ефекту Холла використовуються два типи компараторів постійного струму. Перший тип розглянуто вище. Другий тип – криогенний компаратор постійного струму (позначимо ССС), що працює при температурі рідкого гелію.

Невизначеність порівняння опорів за допомогою криогенних компараторів досягає декількох одиниць на 10^{-9} , що робить цей метод найбільш точним в даний час хоча і набагато більш складним технологічно.

Проте спостерігається стрімкий прогрес у підвищенні точності компараторів струму, що працюють при кімнатній температурі, невизначеність результатів вимірювань за допомогою яких доведена вже до $(1-2) \cdot 10^{-8}$.

Міра 6800 A Measurement International (рис. 4.10), яка входить до складу національного еталону складається з трьох основних частин:



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд міри Холла 6800А

– еталонна система, яка містить криогенний зонд, холлівську структуру (рис. 4.10), вимірювальне обладнання;

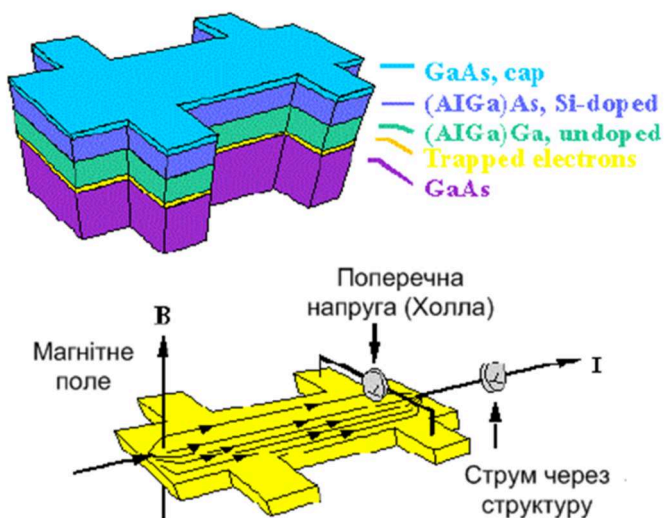


Рисунок 4.10 – Холлівська структура міри 6800 А

– криогенна установка, що містить ємність для рідкого гелію (посудину Дюара) і надпровідний магніт з індукцією до 9 Тл;

– міст-компаратор (працює при кімнатній температурі), який забезпечує передавання холлівського опору ($R=12,9064035$ кОм) мірам опору 1 кОм і 10 кОм з похибкою не більше $2 \cdot 10^{-8}$.

Вимірювальна система 6800 включає прецизійний міст-компаратор постійного струму (Accubridge), що працює при кімнатній температурі повітря і дозволяє порівнювати два резистори з похибкою $2 \cdot 10^{-8}$. В Accubridge використовується пряме порівняння еталона квантового холлівського опору (КХО) безпосередньо з еталонним резистором 1000 Ом. Міст також може бути використаний для вимірювання залежності холлівського опору R_x і повздожнього R_p , щоб забезпечити точність і достовірність вимірювання R_x , простіше кажучи, виконувати всі вимірювання, необхідні для забезпечення точності КХО. Міст і низькотемпературні матриці сканера можуть використовуватися для розширення діапазону в більшу і меншу сторони (повністю автоматизовані) відносно резистора 1000 Ом, щоб встановити значення резисторів 1 Ом, 10 Ом, 100 Ом, 1 кОм, 10 кОм і 13 кОм.

Опис моста Accubridge не містить відомостей щодо методики передачі розміру одиниці від еталона на КЕХ, але можна прогнозувати, що вона представляє собою поєднання компенсаційного і мостового методів. Дійсно, для передачі розміру з 12906,035 Ом до 1 кОм необхідно спочатку передати розмір одиниці до найближчого стандартного номіналу 10000 Ом (компенсаційним методом), а далі – методом масштабного перетворення і компарування за допомогою моста Accubridge, до 1 кОм. Невизначеність, з якою передається розмір одиниці мірам 0,1 Ом, 1 Ом: $1 \cdot 10^{-7}$.

В технічному описі наводяться такі характеристики міри 6800 А:

- похибка передачі розміру КХО резистору 1 кОм: $2 \cdot 10^{-8}$;
- похибка передачі розміру від резистора 1 кОм до 10 кОм і відношення 13 до 1: $2 \cdot 10^{-8}$;
- похибка (0,1 Ом:1 Ом): $1 \cdot 10^{-7}$;

- нестабільність: менш ніж $1 \cdot 10^{-8}$;
- опір ізоляції: більш ніж 10^{13} Ом;
- магнітна індукція 8 Тл (додатково 9 Тл);
- використовується плато №2 ($R_x = 12906,035$);
- температура He: 1,2К;
- об'єм посудини Дьюара: 50 л;
- робочі умови експлуатації: температура від 18°C до 34°C , вологість від 10% до 80% ;

4.2 Масштабування одиниці електричного опору в державному первинному еталоні України

Одиниця електричного опору від “системи відтворення” одиниці, а саме однозначної міри опору SR103 з номінальним значенням $1 \cdot 10^3$ Ом, за допомогою моста – компаратора постійного струму (Accubridge) передається “системі зберігання” одиниці у складі наступних мір: МС3005, МС3006, МС3020, МС3018-1, МС3018-2, МС3018-3 .

Міри електричного опору однозначні МС3005, МС3006, МС3020 застосовуються в якості зразкових мір електричного опору в колах постійного і змінного струму в повітряному або рідинному (конденсаторне масло, гас, кремній-органічна рідина) середовищах. Технічні характеристики МС3005, МС3006, МС3020 наведені в таблиці 4.1.

Міри електричного опору перехідні МС 3018 призначені для передавання одиниці електричного опору від зразкових мір та робочих еталонів мірам, що повіряються, в діапазоні номінальних значень опору 0,001 Ом до 100000 Ом. Міри випускаються в трьох виконаннях, що відрізняються значенням опору ступенів: МС3018-1: 11×10 Ом; МС3018-2: 11×1000 Ом; МС3018-3: 11×10000 Ом. Міри можуть бути застосовані в повітряному або рідинному (конденсаторне масло, гас, кремній-органічна рідина) середовищах. Технічні характеристики МС 3018 наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.1

Параметр	Значення		
	МС3005	МС3006	МС3020
Клас точності	0,0005	0,001	0,0005
Номинальне значення опору, Ом	0,05	0,05	0,001
Потужність розсіювання, Вт:			
номинальна	0,05	0,05	0,001
максимальна	0,1	0,1	0,01
гранична	0,5	0,5	-
Допустиме відхилення дійсного значення опору від номінального, %	± 0,01	± 0,01	± 0,01
ТКС _a , 10 ⁻⁶ 1/° С	±0,5... ±3,5		
Нестабільність на протязі року з дня повірки, %	± 0,0003	± 0,0006	± 0,0003
Температура середовища нормальна,	20 ± 0,1	20 ± 0,1	20 ± 0,2
Температура середовища робоча °С	20 ± 0,5	20 ± 2	20 ± 2
Габаритні розміри, мм	84,5 x 59 x 59		
Маса, кг	0,38		

Таблиця 4.2

Параметр	Значення		
	МС3018-1	МС3018-2	МС3018-3
Номинальне значення опору, Ом:			
одної ступені	10	1000	10000
послідовного з'єднання ступенів	100	10000	100000
паралельного з'єднання ступенів	1	100	1000
Похибка перетворювання, %	± 0,00001	± 0,00001	± 0,00001
Потужність розсіювання одної ступені, Вт:			
номинальна	0,01	0,01	0,01
максимальна	0,05	0,05	0,05
Допустиме відхилення дійсного значення опору одної ступені від номінального, %:	± 0,005	± 0,005	± 0,005
Допустиме відхилення дійсного значення опору послідовного і паралельного з'єднання ступенів від номінального, %:	± 0,001	± 0,001	± 0,001
ТКС _a одної ступені, 10 ⁻⁶ 1/° С	± 3	± 3	± 3
ТКС _a послідовного і паралельного з'єднання ступенів, 10 ⁻⁶ 1/° С	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Добова нестабільність, %	± 0,000003	± 0,000003	± 0,000003
Границі допустимої основної похибки на протязі року з дня повірки	± 0,001	± 0,001	± 0,001
Температура середовища нормальна, °С	20 ± 0,1	20 ± 0,1	20 ± 0,1
Температура середовища робоча, °С	20 ± 1	20 ± 1	20 ± 1
Габаритні розміри, мм	188 x 128 x 115		
Маса, кг	1,5		

4.2.1 Система масштабування і передавання

Передача одиниці електричного опору від мір опору, які входять до складу системи зберігання одиниці, здійснюється системою масштабування одиниці, до складу якої входять наступні пристрої (рисунок 4.7):

- міст – компаратор постійного струму 6622A-HV (діапазон від $1 \cdot 10^{-6}$ Ом до $1 \cdot 10^9$ Ом);
- розширювач діапазону вимірювання опору 6623A-450 (діапазон від $1 \cdot 10^{-6}$ Ом до $1 \cdot 10^{-3}$ Ом);
- тераомний вимірювальний міст 6530XP (діапазон від $1 \cdot 10^6$ Ом до $1 \cdot 10^{14}$ Ом).

Міст постійного струму, компаратор опорів GuildLine 6622A-HV

Вимірювальний міст-компаратор опорів постійному струму серії 6622A виробництва компанії GuildLine Instruments – це одна з найпередовіших на сьогоднішній день моделей мостів постійного струму. Лінійка вимірювальних мостів-компараторів серії 6622A побудована за так званою модульною технологією, що дозволяє проводити їх легку модернізацію (рисунок 4.12), та представлена декількома модифікаціями (див. табл. 4.3), а саме:

- 6622A-B – базова модифікація;
- 6622A-XR – модифікація з розширеним діапазоном вимірювання;
- 6622A-XP – модифікація з покращеними точністними характеристиками;
- 6622A-XPR – модифікація з розширеним діапазоном вимірювання та покращеними точністними характеристиками;
- 6622A-HV – модифікація з покращеними точністними характеристиками та можливістю вимірювання опору постійному струму до 100 ГОм;
- 6622A-XPS – спеціальна модифікація з покращеними точністними характеристиками.

Таблиця 4.3

Лінійка вимірювальних мостів-компараторів опору постійному струму серії
6622А

Модифікація	Діапазон вимірювань	Похибка вимірювань
6622А-В	від 1 мОм до 100 кОм	від $1 \cdot 10^{-7}$
6622А-ХR	від 1 мОм до 100 МОм	від $1 \cdot 10^{-7}$
6622А-ХP	від 1 мОм до 100 кОм	від $5 \cdot 10^{-8}$
6622А-ХPР	від 1 мОм до 100 МОм	від $5 \cdot 10^{-8}$
6622А-НV	від 1 мОм до 100 ГОм	від $4 \cdot 10^{-8}$
6622А-ХPС	від 1 мОм до 100 кОм	від $2 \cdot 10^{-8}$

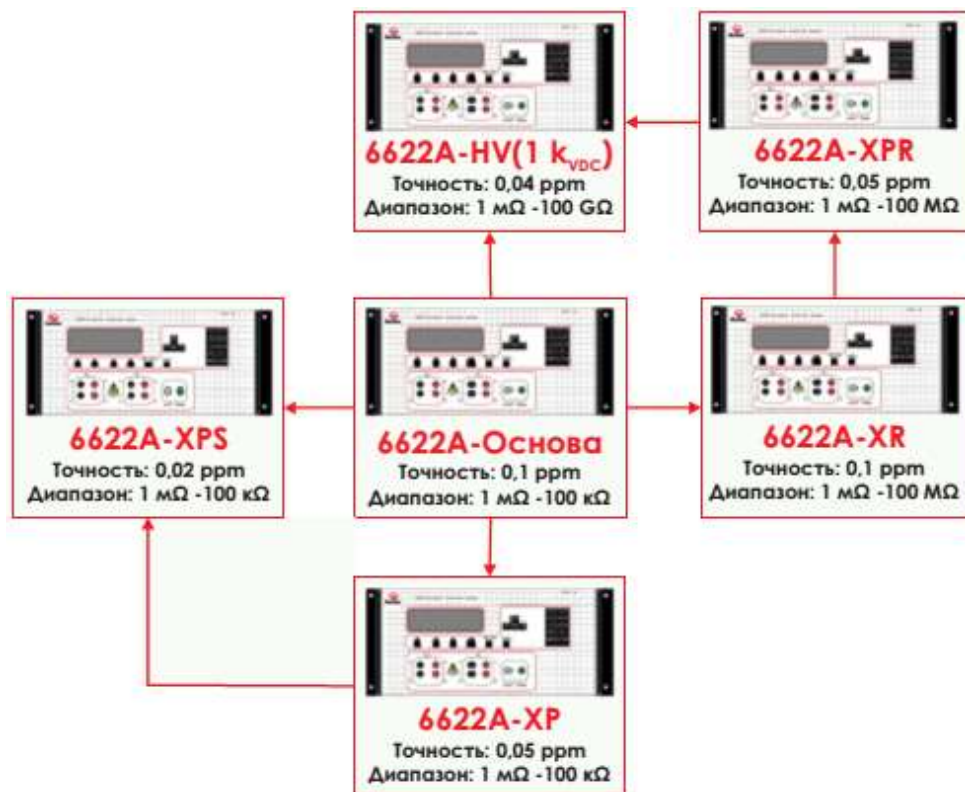


Рисунок 4.12 – Лінійка вимірюваних мостів-компараторів опору серії 6622А

Усі модифікації мостів серії 6622А забезпечують відображення вимірюваного значення величини опору постійному струму з розрядністю 10,5 одиниць, мають можливість графічного відображення інформації щодо вимірювань та дозволяють проводити аналіз невизначеностей при проведенні вимірювань. Особливістю вимірювальних мостів-компараторів серії 6622А є

відхід від історично сформованого співвідношення діапазонів вимірювань 13:1 та введення нових співвідношень вимірюваних опорів: від 0,001:1 до 100:1. Таким чином, всупереч класичному способу передачі одиниці електричного опору, коли набір еталонних мір опору повинен бути представлений усією лінійкою в необхідному діапазоні вимірювання, можна обійтись меншою кількістю мір. А саме, для перекриття діапазону вимірювання від 1 мкОм до 100 МОм буде достатньо лише чотирьох еталонних мір електричного опору. На рисунку 4.13 наведено графік результатів вимірювань міри на діапазоні 100:1 (одиниця передається від міри 10 кОм мірі 1 МОм).

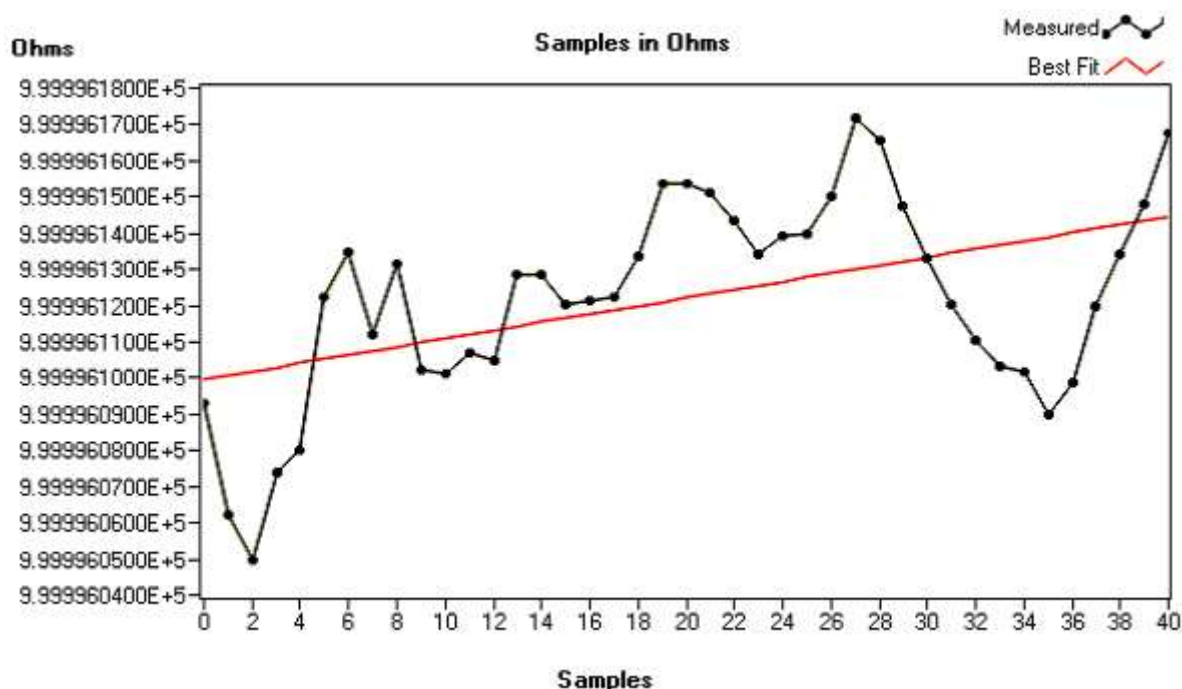


Рисунок 4.13 – Результати вимірювань на діапазоні 100:1

Історично перевірка того факту, що міст DC функціонує у відповідності з його останнім калібруванням (тобто його стабільність) була досить складною. З появою мостів 6622А ця перевірка спростилась. Наприклад, стабільність відношення опорів 1:1 можна перевірити за допомогою двох високо стабільних мір (R_1 і R_2) одного номіналу, міняючи їх місцями (рисунок 4.14). Тоді похибка вимірювання відношення 1:1 в ppm розраховується за формулою:

$$\delta_1 = \frac{1}{2} |K_1 \cdot K_2 - 1| \cdot 10^6, \quad (4.1)$$

де $K_1 = R_1/R_2$, $K_2 = R_2/R_1$.

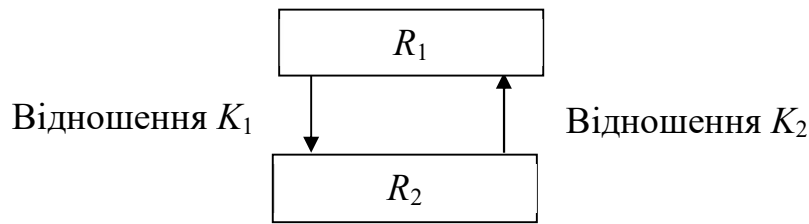


Рисунок 4.14 – Застосування двох стабільних мір опору

Відношення опорів 10:1; 100:1 можуть бути перевірені експериментом з використанням трьох стабільних мір опору, що знаходяться в такому ж відношенні (рисунок 4.15).

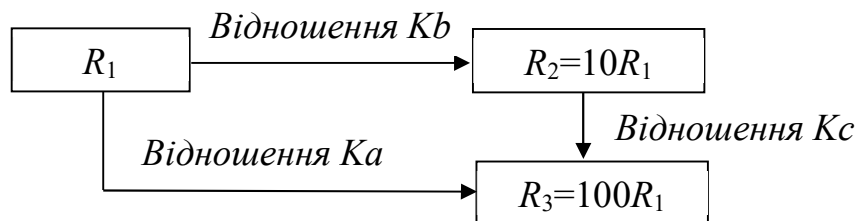


Рисунок 4.15 – Застосування трьох стабільних мір опору

Тоді похибка вимірювання розраховується за формулою:

$$\delta_2 = \{1/3 |K_a \cdot K_c - K_b| / K_a\} \cdot 10^{-6}, \quad (4.2)$$

де K_a – відношення мір R_1 та R_3 ; K_b – відношення мір R_1 та R_2 ; K_c – відношення мір R_2 та R_3 .

Метрологічні характеристики моста компаратора постійного струму модифікації 6622A-NV наведено у таблиці 4.4.

Розширювач діапазону GuildLine 6623A-450

Модульні розширювачі діапазону вимірювань GuildLine серії 6623A дозволяють мостам постійного струму серії 6622A вимірювати більш низькі значення електричного опору (включаючи струмові шунти) більшим струмом. При вимірюванні низьких значень електричного опору модульні розширювачі можуть встановлюватись каскадом для досягнення більш високого

вимірювального струму, що в свою чергу дозволяє зменшити похибки при вимірюванні.

Модульний розширювач 6623А-450 дозволить проводити вимірювання опору постійному струму значенням від 1 мкОм струмом до 450 А. Метрологічні характеристики модульного розширювача діапазону 6623А-450 наведено у таблицях 4.5 –4.7.

Таблиця 4.4

Метрологічні характеристики моста-компаратора постійного струму
модифікації 6622А-НV

Еталонна ОМЕО, R_E	Значення невизначеностей вимірювань (3 роки)					
Фактичний діапазон вимірювання R_X	0,0008 – 0,008	0,008 – 0,08	0,08–0,8	0,8 – 6,3	6,3 –13,4	13,4– 107,5
Номинальний діапазон вимірювання	0,001:1	0,01:1	0,1:1	1:1	10:1	100:1
1 Ом	$\pm 7,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 6,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 1,0 \cdot 10^{-7}$
10 Ом	–	–	$\pm 4,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 1,0 \cdot 10^{-7}$
100 Ом	–	–	$\pm 4,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 3,0 \cdot 10^{-7}$
1 кОм	–	–	$\pm 4,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 8,0 \cdot 10^{-7}$
10 кОм	–	–	$\pm 4,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 5,0 \cdot 10^{-8}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$	$\pm 3,0 \cdot 10^{-6}$
100 кОм	–	–	$\pm 7,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 3,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 6,0 \cdot 10^{-6}$
1 МОм	–	–	$\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$	$\pm 4,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 6,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 8,0 \cdot 10^{-6}$
10 МОм	–	–	$\pm 4,0 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1,0 \cdot 10^{-6}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-6}$	–
100 МОм	–	–	$\pm 8,0 \cdot 10^{-6}$	$\pm 3,5 \cdot 10^{-6}$	$\pm 6,0 \cdot 10^{-6}$	–

Таблиця 4.5

Характеристики вимірювального струму 6623А-450

Діапазон	від 0,1 А до 3 А	від 3 А до 30 А	від 30 А до 450 А
Похибка	$\pm 0,1 \% \pm 0,4$ мА	$\pm 0,3 \% \pm 5$ мА	$\pm 0,3 \% \pm 30$ мА
Нестабільність (10 хв.)	$\pm 0,005 \% \pm 0,1$ мА	$\pm 0,005 \% \pm 2$ мА	$\pm 0,005 \% \pm 3$ мА

Таблиця 4.6

Похибки встановлення коефіцієнта перетворення 6623А-450

Коефіцієнт перетворення	Похибка встановлення коефіцієнта перетворення	Максимальний сила вихідного струму	Діапазон вимірювання опору
20:1	$\pm 3,0 \cdot 10^{-7}$	3 А	від 1 мкОм до 10 Ом
400:1	$\pm 4,0 \cdot 10^{-7}$	30 А	
4000:1	$\pm 5,0 \cdot 10^{-7}$	450 А	

Таблиця 4.7

Похибки вимірювання опору 6623А-450

Діапазон опору, що вимірюється	Діапазон вимірювального струму	Похибка вимірювання для 6622А-В, -ХR	Похибка вимірювання для 6622А-ХR, -ХPR, -НV
від 1 мкОм до 10 мкОм	до 450 А	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,2 \cdot 10^{-5}$
від 10 мкОм до 0,1 мОм	до 450 А	$\pm 8,0 \cdot 10^{-6}$	$\pm 7,0 \cdot 10^{-6}$
від 0,1 мОм до 0,5 мОм	до 450 А	$\pm 2,0 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$
від 0,5 мОм до 0,01 Ом	до 450 А	$\pm 8,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 7,0 \cdot 10^{-7}$
від 1 мОм до 50 мОм	до 30 А	$\pm 7,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 6,0 \cdot 10^{-7}$
від 50 мОм до 10 Ом	до 3 А	$\pm 7,0 \cdot 10^{-7}$	$\pm 6,0 \cdot 10^{-7}$

Вимірювальний міст GuildLine 6530А-ХR

Лінійка вимірювальних мостів постійного струму серії 6530, як і лінійка мостів серії 6622А, побудована за так званою модульною технологією, що дозволяє проводити їх легку модернізацію (рисунок 4.17), та представлена декількома модифікаціями (таблиця 4.8), а саме:

- 6530-В – базова модифікація;
- 6530-ХR – модифікація з розширеним діапазоном вимірювання;
- 6530-ХR – модифікація з покращеними точністними характеристиками;
- 6530-ХPR – модифікація з розширеним діапазоном вимірювання та покращеними точністними характеристиками.

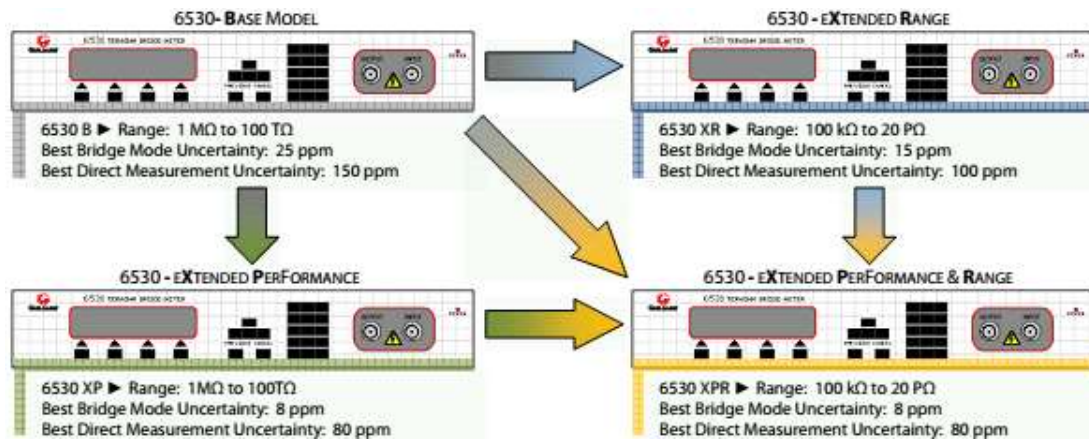


Рисунок 4.17 – Лінійка вимірюваних мостів опору серії 6630

Таблиця 4.8

Лінійка вимірювальних мостів опору постійному струму серії 6630

Модифікація	Діапазон вимірювань	Похибка вимірювань
6530-B	від 1 МОм до 100 ТОм	від $2,5 \cdot 10^{-5}$
6530-XR	від 1 МОм до 20 ПОм	від $1,5 \cdot 10^{-5}$
6530-XP	від 1 МОм до 100 ТОм	від $8,0 \cdot 10^{-6}$
6530-XPR	від 1 МОм до 20 ПОм	від $8,0 \cdot 10^{-6}$

Однією з переваг цього моста є вимірювальна камера (рисунок 4.18), з контролем температури.

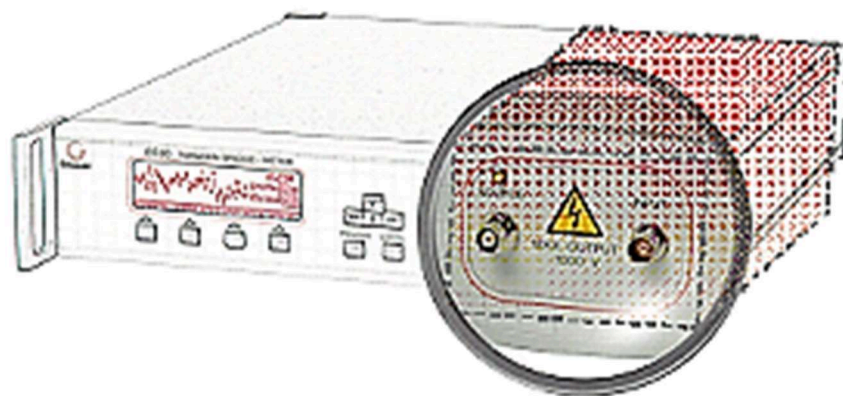


Рисунок 4.18 – Вимірювальна камера мостів опору серії 6530

Вона обладнана входною і вихідною клемми й сприяє збереженню температури протягом проведення вимірювань. Ця камера добре екранована для захисту від температурних шумів. Повітряні потоки, призначені для

охолодження внутрішніх схем моста, розраховано таким чином, щоб повністю усунути пересування повітря поблизу вимірювальної камери. Таким чином, на вимірювальні мости серії 6530 не впливає зміна температури навколишнього середовища в границях від 18 °С до 28 °С. Мости серії 6530 можуть працювати в ручному та автоматизованому режимах. При ручному режимі оператор може контролювати важливі параметри, такі як: час інтегрування, максимальна вимірювальна напруга, рівні реверсування напруга та ін. Автоматичний режим роботи забезпечує вибір: оптимального діапазону вимірювання, часу інтегрування (від 5 мс до 10^3 с) та оптимальної вимірювальної напруги (від 1 В до 10^3 В).

Уся лінійка вимірювальних мостів серії 6530 підтримує два режими роботи: режим прямих вимірювань і режим вимірювального моста. У режимі прямих вимірювань прилад проводить пряме вимірювання значення опору міри, підключеної до нього. В режимі вимірювального моста звіряються дві міри, підключені до приладу. Як і мости серії 6622 модель 6530 має діапазони вимірювань, 100:1 та 1000:1, що дозволяє значно зменшити кількість еталонних мір електричного опору для охоплення максимального діапазону вимірювань. Метрологічні характеристики вимірювального моста модифікації 6530-ХР наведено у таблицях 4.9–4.11.

Таблиця 4.9

Невизначеності вимірювань моста 6530-ХР в режимі вимірювального моста

Діапазон вимірювання	Вимірювальна напруга	Невизначеність вимірювань (24 години)
від 2 МОм до 20 МОм	1 В	$\pm 8,0 \cdot 10^{-6}$
від 20 МОм до 200 МОм	від 1 В до 10 В	$\pm 8,0 \cdot 10^{-6}$
від 200 МОм до 2 ГОм	від 1 В до 100 В	$\pm 8,0 \cdot 10^{-6}$
від 2 ГОм до 20 ГОм	від 1 В до 1000 В	$\pm 1,0 \cdot 10^{-5}$
від 20 ГОм до 200 ГОм	від 10 В до 1000 В	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
від 200 ГОм до 2 ТОм	від 100 В до 1000 В	$\pm 5,0 \cdot 10^{-5}$
від 2 ТОм до 20 ТОм	1000 В	$\pm 1,2 \cdot 10^{-4}$
від 20 ТОм до 200 ТОм	1000 В	$\pm 2,0 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 4.10

Невизначеності вимірювань моста 6530-ХР в режимі прямих вимірювань

Діапазон вимірювання	Вимірювальна напруга	Невизначеність вимірювань (12 місяців)
від 2 МОм до 20 МОм	1 В	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$
від 20 МОм до 200 МОм	від 1 В до 10 В	$\pm 8,0 \cdot 10^{-5}$
від 200 МОм до 2 ГОм	від 1 В до 100 В	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$
від 2 ГОм до 20 ГОм	від 1 В до 1000 В	$\pm 4,0 \cdot 10^{-4}$
від 20 ГОм до 200 ГОм	від 10 В до 1000 В	$\pm 6,0 \cdot 10^{-4}$
від 200 ГОм до 2 ТОм	від 100 В до 1000 В	$\pm 1,0 \cdot 10^{-3}$
від 2 ТОм до 20 ТОм	1000 В	$\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$
від 20 ТОм до 200 ТОм	1000 В	$\pm 4,0 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 4.11

Невизначеності вимірювання струму мостом 6530-ХР

Діапазон струму	Невизначеність вимірювань (12 місяців)
від 1 мкА до 10 мкА	$\pm 0,1 \%$
від 100 нА до 1 мкА	$\pm 0,1 \%$
від 10 нА до 100 нА	$\pm 0,2 \%$
від 1 нА до 10 нА	$\pm 0,2 \%$
від 100 пА до 1 нА	$\pm 0,2 \%$
від 10 нА до 100 пА	$\pm 1,0 \%$

4.2.2 Набір еталонних мір

Одиниця електричного опору від “системи зберігання” передається за допомогою моста-компаратора до “системи масштабування та передавання”, яка складається із набору мір електричного опору в діапазоні від $1 \cdot 10^{-4}$ Ом до $1 \cdot 10^{12}$ Ом. Система масштабування та передавання складається з наступних мір (рисунок 4.7): Р323, Р310, Р321, Р4013, Р4023, Р4033, Р4030М1, Р4085М1, Р40112, Р40114.

Міра опору Р323 вимірювальна призначена для перевірки і підгонки шунтів і робочих мір опору, перевірки електровимірювальних приладів в мостових та потенціометричних схемах постійного струму.

Технічні характеристики міри Р323:

- опір - 0,0001 Ом;
- клас точності - 0,05;
- потужність: номінальна – 10Вт, максимальна – 100Вт;
- охолодження приладу - масляно-водяне.

Міра електричного опору Р310 являє собою зразкову міру опору і призначена для перевірки і підгонки в колах постійного струму робочих мір опору, а також зразкових і робочих (лабораторних) вимірювальних приладів.

Номінальний опір 0,001 Ом; 0,01 Ом.

Клас точності 0,01.

Міра опору Р310 експлуатується в рідинному середовищі (конденсаторне масло, гас, кремнійорганічна рідина).

Допустиме відхилення опорів від їх номінальних значень через неточності підгонки при температурі 20°C і потужності не вище номінальної для класу точності 0,01 не більше $\pm 0,01\%$.

Зміна опору протягом року не більш $\pm 0,002\%$.

Зміна дійсного значення опору при зміні потужності від номінальної до найбільшої допустимої при сталому тепловому стані не більше $\pm 0,005\%$.

Технічні характеристики наведені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12

Технічні характеристики міри Р310

Тип міри	Клас точності	Номінальний опір, Ом	Номінальна допустима потужність, Вт	Найбільша допустима потужність, Вт	Опір ізоляції, МОм
Р310	0,01	0,001; 0,01	0,1	1	1000

Міра електричного опору Р321 являє собою зразкову міру опору і призначена для перевірки і підгонки в колах постійного струму робочих мір

опору, а також зразкових і робочих (лабораторних) вимірювальних приладів.

Номинальний опір 0,1 Ом; 1 Ом; 10 Ом. Клас точності 0,01.

Міра електричного опору Р321 експлуатується в рідинному середовищі (конденсаторне масло, гас, кремнійорганічна рідина).

Допустиме відхилення опорів міри Р321 від їх номінальних значень через неточності підгонки при температурі 20°C і потужності не вище номінальної не більш $\pm 0,01\%$.

Зміна опору протягом року не більш $\pm 0,002\%$.

Зміна дійсного значення опору при зміні потужності від номінальної до найбільшої допустимої при сталому тепловому стані не більше $\pm 0,005\%$.

Технічні характеристики наведені в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13

Технічні характеристики міри Р321

Тип міри	Клас точності	Номинальний опір, Ом	Номинальна допустима потужність, Вт	Найбільша допустима потужність, Вт	Опір ізоляції, МОм
Р321	0,01	0,1; 1; 10	0,1	1	1000

Міра електричного опору Р331 являє собою зразкову міру опору і призначена для перевірки і підгонки в колах постійного струму робочих мір опору, а також зразкових і робочих (лабораторних) вимірювальних приладів.

Номинальний опір 100 Ом; 1000 Ом; 10000 Ом; 100000 Ом. Клас точності 0,01.

Міра електричного опору Р331 експлуатується в рідинному середовищі (конденсаторне масло, гас, кремнійорганічна рідина).

Допустиме відхилення опорів від їх номінальних значень через неточності підгонки при температурі 20°C і потужності не вище номінальної не більш $\pm 0,01\%$.

Зміна опору протягом року не більш $\pm 0,002\%$.

Зміна дійсного значення опору при зміні потужності від номінальної до найбільшої допустимої при сталому тепловому стані не більше $\pm 0,005\%$.

Технічні характеристики наведені в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14

Технічні характеристики міри Р331

Тип міри	Клас точності	Номинальний опір, Ом	Номинальна допустима потужність, Вт	Найбільша допустима потужність, Вт	Опір ізоляції, МОм
Р331	0,01	100; 1000	0,1	1	1000
Р331	0,01	10000	0,1	1	5000
Р331	0,01	100000	0,1	1	50000

Міра електричного опору вимірювальна Р4013 призначена для застосування в якості однозначних мір електричного опору (ОМЕО) в колах постійного струму.

Технічні характеристики міри Р4013 наведені в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15

Технічні характеристики міри Р4013

Назва параметра	Р4013
Клас точності	0,005
Номинальний опір, Ом	$1 \cdot 10^6$
Потужність: номинальна, В максимальна, В	220 700
Електричний опір ізоляції між струмоведучим колом та корпусом міри, Ом, не менш	$5 \cdot 10^{11}$
Електрична міцність ізоляції, кВ	3,0
Температурний коефіцієнт опору, K^{-1} , не більш	$10 \cdot 10^{-6}$
Габаритні розміри, мм	115 x 125 x 260
Маса, кг	1,8

Допустиме відхилення дійсного значення опору від номінального значення при первинній повірці міри Р4013 (при випуску з підприємства-виготовлювача) не перевищує $\pm 0,01$ % при нормальних умовах застосування.

Допустима зміна опору за рік (нестабільність) міри Р4013 не перевищує $\pm 0,005\%$. Границі допустимої додаткової похибки, викликані зміною температури навколишнього повітря між верхньою (нижньою) межею діапазону температур нормальних умов застосування і деякою точкою в

суміжній області температур робочих умов застосування, що відповідає найбільшій зміні опору, K_{\max} , дорівнює $\pm 0,005$ %. Значення опору (R_t) міри в омах при температурі t °С в межах робочих температур, визначається за формулою 4.3.

Границі допустимої додаткової похибки у відсотках від її номінального значення при зміні напруги від номінального до будь-якого значення, що не перевищує максимального, при нормальних умовах застосування та сталому тепловому стані не перевищує $\pm 0,005$.

Міра опору Р4023 вимірювальна призначена для застосування в якості однозначних мір електричного опору (ОМЕО) в колах постійного струму.

Технічні характеристики міри Р4023 наведені в таблиці 4.16.

Допустиме відхилення дійсного значення опору від номінального значення при первинній повірці міри Р4023 (при випуску з підприємства-виготовлювача) не перевищує $\pm 0,01$ % при нормальних умовах застосування

Таблиця 4.16

Технічні характеристики міри Р4023

Назва параметра	Р4023
Клас точності	0,005
Номінальний опір, Ом	$1 \cdot 10^7$
Потужність: номінальна, В максимальна, В	550 1500
Електричний опір ізоляції між струмоведучим колом та корпусом міри, Ом, не менш	$5 \cdot 10^{12}$
Електрична міцність ізоляції, кВ	5,0
Температурний коефіцієнт опору, K^{-1} , не більш	$15 \cdot 10^{-6}$
Габаритні розміри, мм	115 x 125 x 260
Маса, кг	1,8

Допустима зміна опору за рік (нестабільність) не перевищує $\pm 0,005$ %.

Границі допустимої додаткової похибки, викликані зміною температури навколишнього повітря між верхньою (нижньою) межею діапазону температур нормальних умов застосування і деякою точкою в суміжній області температур робочих умов застосування, що відповідає

найбільшій зміні опору, K_{\max} , дорівнює $\pm 0,005\%$. Значення опору (R_t) в омах при температурі t °C в межах робочих температур, визначається за 4.3.

Границі допустимої додаткової похибки у відсотках від її номінального значення при зміні напруги від номінального до будь-якого значення, що не перевищує максимального, при нормальних умовах застосування та сталому тепловому стані не перевищує $\pm 0,005$.

Міра опору P4033 вимірювальна призначена для застосування в якості однозначних мір електричного опору (ОМЕО) в колах постійного струму.

Технічні характеристики міри P4033 наведені в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17

Технічні характеристики міри P4073

Назва параметра	P4033
Клас точності	0,005
Номінальний опір, Ом	$1 \cdot 10^8$
Потужність: номінальна, В максимальна, В	550 1500
Електричний опір ізоляції між струмоведучим колом та корпусом міри, Ом, не менш	$1 \cdot 10^{13}$
Електрична міцність ізоляції, кВ	5,0
Температурний коефіцієнт опору, K^{-1} , не більш	$15 \cdot 10^{-6}$
Габаритні розміри, мм	115 x 125 x 290
Маса, кг	1,8

Допустиме відхилення дійсного значення опору від номінального значення при первинній повірці міри P4033 (при випуску з підприємства-виготовлювача) не перевищує $\pm 0,01\%$ при нормальних умовах застосування.

Допустима зміна опору за рік (нестабільність) не перевищує $\pm 0,005\%$.

Границі допустимої додаткової похибки, викликані зміною температури навколишнього повітря між верхньою (нижньою) межею діапазону температур нормальних умов застосування і деякою точкою в суміжній області температур робочих умов застосування, що відповідає найбільшій зміні опору, K_{\max} , дорівнює $\pm 0,005\%$. Значення опору (R_t)

котушки в омах при температурі t °С в межах робочих температур, визначається за формулою 4.3.

Границі допустимої додаткової похибки у відсотках від її номінального значення при зміні напруги від номінального до будь-якого значення, що не перевищує максимального, при нормальних умовах застосування та сталому тепловому стані не перевищує $\pm 0,005$.

Міра електричного опору однозначна Р4030М1 призначена для застосування в якості зразкової міри електричного опору у вимірювальних колах постійного струму.

Технічні характеристики міри Р4030М1:

- номінальний опір: $1 \cdot 10^9$ Ом;
- клас точності: 0,01;
- напруга на приладі: номінальна – 1000В, максимальна – 2000В;
- температурний коефіцієнт опору: $2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;
- габаритні розміри: діаметр 120 мм, висота 180мм;
- маса: 0,9 кг.

Міра-імітатор Р4085-М1 призначена для відтворення електричного опору постійному струму в умовах макрокліматичних районів з помірним, холодним і тропічним кліматом.

Основні параметри і вид підключення повинні відповідати зазначеним у табл. 4.18.

Таблиця 4.18

Технічні характеристики міри Р4085М1

Номінальний опір	Вид підключення	Границі допустимої основної похибки	Напруга	
			Номінальна	Найбільш допустима
1 ГОм	2-зажимне	$\pm 0,05$ %	100 В	500 В
10 ГОм	3-зажимне	$\pm 0,05$ %		
100 ГОм	3-зажимне	$\pm 0,1$ %		
1000 ГОм	3-зажимне	$\pm 0,2$ %		

Допустима основна похибка, визначена у відсотках від номінального

значення опору, не перевищує $\pm 0,2 \%$.

Дійсне значення опору 1 ГОм при температурі $t^\circ\text{C}$ в омах в межах робочих умов застосування повинно визначатися за формулою 4.3:

$$R_t = R_{20} + R_{\text{номін}} [\alpha(t-20) + \beta(t-20)^2], \quad (4.3)$$

де R_{20} – дійсне значення опору 1 ГОм при температурі $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, Ом; α і β – температурні коефіцієнти опору, визначені експериментальним шляхом; $R_{\text{номін}}$ – номінальне значення опору, Ом.

Відхилення дійсного значення опору від значення, визначеного за формулою, не перевищує $\pm 0,02 \%$ при напрузі не більше найбільшого допустимого.

Границі допустимої додаткової похибки опору, викликані зміною температури навколишнього повітря від 20°C до найбільшого (найменшого) значення температури в діапазоні робочих умов застосування – не перевищує половини границі основної похибки на кожні 5°C зміни температури.

Опір ізоляції між вимірювальним колом (затискачі "1", "2", "0") і екраном (затискач "3") – не менше $1 \cdot 10^{13}$ Ом, між екраном (затискач "3") і корпусом – не менше $5 \cdot 10^{11}$ Ом.

Міри опору Р40112 призначені:

- для передачі значень електричного опору від зразкових мір Р40112 у вимірювальних колах постійного струму шляхом паралельно-послідовного перемикування ступенів (МПЭС);
- для використання в якості багатозначних мір Р40112 електричного опору (БМЕО) – у вимірювальних колах постійного струму.

Основні параметри мір Р40112 наведені в табл. 4.19.

Границі допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці мір Р40112 (при випуску з підприємства-виробника) становить $0,02 \%$ при дотриманні нормальних умов застосування.

Границі допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці (при випуску з підприємства-виробника) становить $0,01 \%$ при дотриманні нормальних умов застосування.

Таблиця 4.19

Технічні характеристики міри Р40112

Параметри	Р40112
Число основних ступенів	10
Число резервних ступенів	1
Номинальний опір міри (МПЭС), Ом при з'єднанні ступенів:	
паралельному	$1 \cdot 10^5$
послідовному	$1 \cdot 10^7$
Номинальне значення опору однієї ступені міри, Ом	$1 \cdot 10^6$
Клас точності міри:	
для МПЭС	0,01
для ММЭС	0,02
Номинальне значення напруги, що прикладається до міри при послідовному з'єднанні всіх ступенів, кВ	1,0
Максимальне значення напруги, що прикладається до міри при послідовному з'єднанні всіх ступенів, кВ	3,0
Номинальна напруга на ступені міри, кВ	0,1
Максимальна напруга на ступені міри, кВ	0,6
Габаритні розміри, мм	215 x 132 x 255
Маса, кг, не більш	3,0

Похибка передачі значень електричного опору не перевищує $\pm 0,0002\%$ (МПЭС) при дотриманні нормальних умов і доповнень:

- зміна температури (навколишнього середовища) за час передачі значень електричного опору не перевищує $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- напруги на мірі не вище номінальних, зазначених у таблиці 4.19.

Допустима зміна опору (МПЭС) за рік (нестабільність) з дня першої атестації не перевищує значень допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці мір.

Границі допустимої додаткової похибки, викликані зміною температури навколишнього повітря між верхньою (нижньою) межею діапазону температур нормальних умов застосування і деякою точкою в суміжній області температур робочих умов застосування, що відповідає

найбільшій зміні R_{\max} , чисельно дорівнює значенню границь допустимої основної похибки (допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці мір).

Границі допустимої додаткової похибки у відсотках від її номінального значення при зміні потужності розсіювання від номінального до будь-якого значення, що не перевищує максимальну потужність при нормальних умовах застосування та сталому стані теплової рівноваги, чисельно дорівнює значенню границь допустимої основної похибки (допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці мір).

Границі допустимої додаткової похибки у відсотках від її номінального значення при зміні напруги від номінального до будь-якого значення, що не перевищує максимальну напругу при нормальних умовах застосування та сталому стані теплової рівноваги, чисельно дорівнює значенню границь допустимої основної похибки (допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці мір).

Ізоляція між корпусом та ізольованою від корпусу по постійному струму електричного кола міри витримує протягом 1 хвилини дію випробувальної напруги змінного струму частотою (50 ± 1) Гц, амплітудне значення якого дорівнює 7 кВ. Допускається використовувати випробувальну напругу постійного струму значенням 7 кВ.

Електричний опір ізоляції між корпусом та ізольованою по постійному струму електричного кола міри, що має спеціальний пристрій для зменшення впливу струмів витoku, в робочих умовах застосування не менше $5 \cdot 10^{13}$ Ом.

Міра перехідна електричного опору Р40114 призначена: для передачі значень електричного опору від зразкових мір Р40114 у вимірювальних колах постійного струму шляхом паралельно-послідовного перемикання ступенів (МПЭС); для використання в якості багатозначних мір Р40114 електричного опору (БМЕО) у вимірювальних колах постійного струму.

Основні параметри мір Р40114 наведені в табл. 4.20.

Технічні характеристики міри Р40114

Параметри	Р40114
Число основних ступенів	10
Число резервних ступенів	1
Номинальний опір, Ом, при з'єднанні ступенів:	
Параметри	Р40114
паралельному	$1 \cdot 10^7$
послідовному	$1 \cdot 10^9$
Номинальне значення опору однієї ступені міри, Ом	$1 \cdot 10^8$
Клас точності міри:	0,02
Номинальне значення напруги, що прикладається до міри при послідовному з'єднанні всіх ступенів, кВ	3,0
Максимальне значення напруги, що прикладається до міри при послідовному з'єднанні всіх ступенів, кВ	3,0
Номинальна напруга на ступені міри, кВ	0,6
Максимальна напруга на ступені міри, кВ	2,0
Габаритні розміри, мм	215 x 132 x 255
Маса, кг, не більш	2,6

Границі допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці (при випуску з підприємства-виробника) становить 0,02 % при дотриманні нормальних умов застосування.

Границі допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці (при випуску з підприємства-виробника) становить 0,02 % при дотриманні нормальних умов застосування.

Похибка передачі значень електричного опору не перевищує $\pm 0,0005$ % при дотриманні нормальних умов і доповнень:

зміна температури (навколишнього середовища) за час передачі значень електричного опору не перевищує 0,3 °С; напруги на мірі не вище номінальних, зазначених у таблиці 4.20.

Допустима зміна опору за рік (нестабільність) з дня першої атестації не перевищує значень допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці.

Границі допустимої додаткової похибки, викликані зміною температури навколишнього повітря між верхньою (нижньою) межею діапазону температур нормальних умов застосування і деякою точкою в суміжній області температур робочих умов застосування, що відповідає найбільшому зміні R_{max} , чисельно дорівнює значенню границь допустимої основної похибки (допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці).

Границі допустимої додаткової похибки у відсотках від її номінального значення при зміні потужності розсіювання від номінального до будь-якого значення що не перевищує максимальну потужність при нормальних умовах застосування та сталому стані теплової рівноваги, чисельно дорівнює значенню границь допустимої основної похибки (допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці).

Границі допустимої додаткової похибки у відсотках від її номінального значення при зміні напруги від номінального до будь-якого значення, що не перевищує максимальну напругу при нормальних умовах застосування та сталому стані теплової рівноваги, чисельно дорівнює значенню границь допустимої основної похибки (допустимого відхилення дійсного значення опору від номінального при первинній повірці).

Ізоляція між корпусом та ізольованою від корпусу по постійному струму електричного кола міри витримує протягом 1 хвилини дію випробувальної напруги змінного струму частотою (50 ± 1) Гц, амплітудне значення якого дорівнює 7 кВ. Допускається використовувати випробувальна напруга постійного струму значенням 7 кВ.

Електричний опір ізоляції між корпусом та ізольованою по постійному струму електричного кола міри, що має спеціальний пристрій для зменшення впливу струмів витоку, в робочих умовах застосування не менше $5 \cdot 10^{13}$ Ом.

4.3 Оцінювання відповідності ЗВТ електричного опору метрологічним вимогам за результатами їх калібрування

В стандарті [42], п. 7.8.4, сказано, що сертифікат про калібрування у разі потреби може включати в себе твердження про відповідність вимогам або специфікаціям. Таким твердженням є заява про придатність ЗВТ до використання з ймовірністю відповідності p_c .

Для оцінки ймовірності відповідності p_c метрологічних характеристик ЗВТ вимогам документації використовують вирази [52, 99]:

$$p_c = F\left(\frac{MPE - |\hat{\Delta}|}{u}\right),$$

у разі оцінки придатності ВП та:

$$p_c = F\left(\frac{\hat{X}_n - \hat{X}_c}{u}\right),$$

у разі оцінки придатності ММ.

У цих виразах: MPE – границя максимально допустимої похибки ВП; $\hat{\Delta}$ – оцінка систематичної похибки (зсуву) в точці калібрування ВП; \hat{X}_n – номінальне значення ММ; \hat{X}_c – значення ММ, знайдене внаслідок калібрування; F і u – відповідно закон розподілу та сумарна стандартна невизначеність вимірюваної при калібруванні величини.

На рис. 4.19 наведено отримані в роботі [76] залежності $F(z)$ для рівномірного, трикутного, трапецеїдального та нормального законів розподілу вимірюваної величини.

Отримане значення ймовірності відповідності p_c власник ЗВТ, що пройшло калібрування порівнює з допустимим значенням ймовірності p_0 . Якщо $p_c \leq p_0$, ЗВТ рахується придатним до використання, якщо $p_c < p_0$, ЗВТ рахується непридатним до використання.

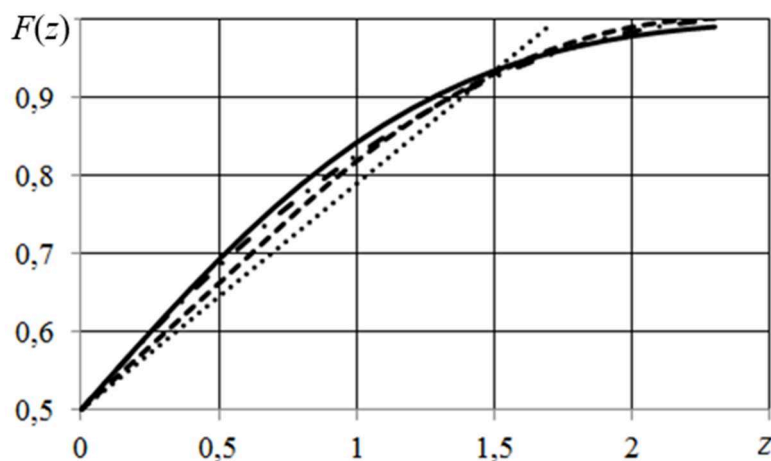


Рисунок 4.19 – Залежності $F(z)$ для рівномірного (\cdots), трапецеїдального ($--$) з $\gamma=0,5$, трикутного ($- \cdots -$) і нормального ($-$) законів розподілу

4.4 Корекція міжкалібрувальних інтервалів ЗВТ електричного опору

Важливим аспектом для забезпечення простежуваності та отримання надійних результатів вимірювань у лабораторії є визначення максимального терміну, який має бути дозволений між послідовними калібруваннями – міжкалібрувального інтервалу (МКІ).

П.п. 5.5.8 ISO/IEC 17025:2017 [42] говорить: “Все обладнання, що знаходиться під контролем лабораторії і потребує калібрування, має бути марковане, закодоване або будь-яким іншим чином ідентифіковано (позначений статус калібрування, включаючи дату останнього калібрування, а також дату та критерій необхідності проведення повторного калібрування), якщо це практично можливо”.

Загальна мета періодичного калібрування:

- поліпшити оцінювання відхилення між еталонним значенням і значенням, отриманим з використанням ЗВТ та невизначеності цього відхилення під час фактичного використання ЗВТ;

- заявити невизначеність, яка може бути досягнута під час використання конкретного ЗВТ;

- підтвердити наявність будь-яких змін у ЗВТ, які могли б поставити під сумнів результати, одержані за певний період.

Найбільш значущими причинами, що впливають на тривалість МКІ, є:

- необхідна чи заявлена лабораторією невизначеність вимірювань;
- ризик перевищити межі максимально допустимої похибки ЗВТ під час використання;

- вартість необхідного виправлення результатів вимірювань при виявленні невідповідності протягом певного часу ЗВТ встановленим вимогам;

- тип ЗВТ;

- тенденція до зносу та дрейфу;

- рекомендації виробника;

- умови експлуатації;

- умови довкілля (кліматичні умови, вібрація, іонізуюче випромінювання тощо);

- дані про тенденції, отримані з попередніх звітів про калібрування;

- зареєстрована історія зберігання та обслуговування;

- частота порівняння з іншими еталонами або вимірювальними приладами;

- частота та якість проміжних перевірок між калібруваннями;

- умови транспортування та ризик;

- кваліфікація обслуговуючого персоналу.

Початкове рішення про визначення інтервалу калібрування ґрунтується на наступних факторах:

- рекомендація виробника приладу;

- очікуваний ступінь та інтенсивність використання;

- вплив довкілля;

- потрібна невизначеність вимірювання;

- максимально допустимі похибки (наприклад, встановлені законодавчими метрологічними органами);

- регулювання індивідуального приладу (або зміни);
- вплив вимірюваної величини (наприклад, інтенсивний вплив температури на термомпари);
- дослідні або опубліковані дані про ті ж чи аналогічні пристрої.

Після проведеного калібрування на регулярній основі, може бути проведений перегляд калібрувальних інтервалів для того, щоб оптимізувати баланс ризиків та витрат. Це необхідно зробити, якщо буде встановлено, що початково обрані інтервали не дають бажаних оптимальних результатів у зв'язку з низкою причин, наприклад:

- прилади можуть бути менш надійними, ніж очікувалося;
- їх використання може бути не таким, як очікувалося;
- може бути недостатнім проведення обмеженого калібрування деяких приладів замість повного калібрування;
- дрейф, визначений при повторному калібруванні приладів, може показати, що калібрувальні інтервали можуть бути збільшені без підвищення ризиків і т.д.

Існує ряд методів, доступних для перегляду калібрувальних інтервалів. Вибраний метод може відрізнятися залежно від того:

- прилади враховуються окремо або в групах (наприклад, за моделлю виробника або за типом);
- прилади перевищують межі калібрування через тимчасовий дрейф або через використання;
- прилади демонструють різноманітні види нестабільності;
- прилади піддаються регулюванню;
- є дані і важливою є прив'язка до історії калібрування приладів.

Метод 1: Автоматичне регулювання або «сходи» (календарний термін служби)

Щоразу, коли прилад калібрується на регулярній основі, наступний інтервал продовжується, якщо встановлено, що його похибка знаходиться в межах, наприклад, 80% від необхідної максимально допустимої похибки

вимірювання, або зменшується, якщо похибка буде поза цією максимально допустимою похибкою. Цей «сходовий» відгук дозволяє виконувати оперативне регулювання інтервалів і легко здійснюється без канцелярських зусиль. При збереженні та використанні записів будуть відомі можливі проблеми з групою приладів, що вказують на необхідність їх технічної модифікації або профілактики.

Недоліком системи індивідуальних приладів може бути те, що важко підтримувати обсяг роботи калібрування однорідним і збалансованим, і що він вимагає детального попереднього планування.

Було б недоречно брати екстремальний інтервал, використовуючи цей метод. Ризик, пов'язаний з вилученням великої кількості випущених сертифікатів, або перероблення великої кількості роботи зрештою може бути неприйнятним.

Метод 2: Контрольна карта (календарний термін служби)

Контрольна карта є одним з найважливіших інструментів статистичного контролю якості та добре описана в різних публікаціях. Цей принцип працює наступним чином: вибираються значні точки калібрування та результати наносяться на графік залежно від часу. За цими даними обчислюються дисперсії результатів і дрейф, який може бути середнім протягом одного МКІ, або, у разі дуже стабільних приладів, середнім за кілька МКІ. За цими результатами можна розрахувати оптимальний інтервал.

Цей метод важко застосувати у разі комплексу приладів. Він може бути використаний тільки при автоматичній обробці даних. Перед розрахунками необхідне знання закону мінливості приладів, які калібруються або аналогічних. За його застосування важко досягти збалансованого обсягу роботи. Проте застосування цього методу дозволяє отримати значну варіацію інтервалів калібрування від початково передбачених; може бути обчислена достовірність і принаймні теоретично може бути отриманий ефективний калібрувальний інтервал. Крім того, розрахунок дисперсії результатів буде

вказувати, що межі специфікації заводу-виробника є обґрунтованими та аналіз знайденого дрейфу може допомогти із зазначенням причин дрейфу.

Метод 3: «Використання» часу

Це варіація вищезазначених методів. Основний метод залишається незмінним, але калібрувальний інтервал відображається у годинах використання, а не календарних місяцях. Прилад, оснащений індикатором часу, спрямовується для калібрування, коли індикатор досягає певного значення.

Прикладом таких приладів є термомпари, що використовуються при екстремальних температурах, тестер вантажопідйомності для вимірювання тиску газу, щупи (тобто інструменти, які можуть бути предметом механічного зношування). Важлива теоретична перевага цього способу полягає в тому, що кількість калібрування і, отже, вартість калібрування безпосередньо залежить від тривалості часу, протягом якого використовується прилад.

Крім того є автоматична перевірка використання приладу. Тим не менш, є багато практичних недоліків у використанні автоматичної перевірки, в тому числі:

- вона не може бути використана з пасивними приладами (наприклад, атенюаторами) або еталонами (опір, ємність тощо);
- вона не повинна бути використана, якщо відомо, що прилад дрейфує або погіршується, коли він знаходиться на зберіганні або в продажу, або при впливі на нього деякої кількості коротких циклів включення-вимкнення;
- початкова вартість надання та встановлення відповідних таймерів висока, і оскільки користувачі можуть заважати їм, може знадобитися контроль, який знову призведе до збільшення витрат;
- ще більш важко досягти плавного потоку робіт, ніж при способах, зазначених вище, оскільки калібрувальна лабораторія не має уявлення про дату завершення МКІ.

Метод 4: Сервісна перевірка або тестування методом «чорної

скриньки»

Це варіація 1 і 2 методів і особливо підходить для складних приладів або випробувальних консолей. Критичні параметри перевіряються часто (один раз на день або навіть частіше) переносним калібрувальним приладом, або переважно за допомогою чорної скриньки, виготовленої спеціально для перевірки обраних параметрів.

Якщо прилад виявляється поза межами допустимої похибки, визначеної за допомогою «чорної скриньки», він повертається для повного калібрування.

Основною перевагою цього методу є те, що він забезпечує максимальну доступність для користувача приладу. Він дуже підходить для приладів, географічно віддалених від калібрувальної лабораторії, повне калібрування яких виконується лише тоді, коли відомо, що це необхідно. Складність полягає у прийнятті рішення про критичні параметри та у проектуванні «чорної скриньки».

Хоча теоретично цей метод дуже надійний, він трохи неоднозначний, тому що прилад може виходити за межі допустимої похибки від деякого параметра, що не вимірюється «чорною скринькою». Крім того, характеристики «чорної скриньки» самі по собі не можуть залишатися постійними.

Прикладами приладів, придатних для даного методу, є: вимірники щільності (резонансного типу); платинові термометри опору (у поєднанні з методами календарного терміну служби); дозиметри (включаючи джерело); та вимірювачі звукового рівня (включаючи джерело).

Метод 5: Інші статистичні підходи

Методи, що ґрунтуються на статистичному аналізі окремого приладу або типу приладів, також можуть бути успішно застосовані при перегляді МКІ, особливо коли має бути відкалібрована велика кількість однакових приладів (тобто групи приладів). Ці методи викликають все більший інтерес, особливо при використанні у поєднанні з адекватними програмними засобами.

Запропонований нами підхід до перегляду МКІ

РМГ 74-2004 [100] рекомендується встановлювати МКІ в місяцях, використовуючи наступний ряд: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 15; 18; 21; 24; 30 і т.д. через 6 міс.

Корекція МКІ може проводитися за результатами перекалібрувань методом сходів [101].

Вихідна інформація для перегляду МКІ:

- вихідний МКІ T_0 ;
- значення максимально допустимої похибки ЗВТ (MPE), встановлене виробником;
- похибка ЗВТ Δ_{N-1} та її розширена невизначеність U_{N-1} , вказані в передостанньому сертифікаті калібрування;
- похибка ЗВТ Δ_N та її розширена невизначеність U_N , вказані в останньому сертифікаті калібрування.

На підставі цієї вихідної інформації здійснюється перевірка метрологічної придатності ЗВТ за наступним алгоритмом:

1) Перевіряється виконання нерівності:

$$|\Delta_N| \leq MPE - U_N \quad (4.4)$$

Якщо нерівність (4.4) виконується, можна збільшити МКІ на один щабель із ряду, вказаного в [100].

2) Якщо нерівність (4.4) не виконується, необхідно оцінити ймовірність відповідності p_c за формулою:

$$p_c = F_N(z), \quad (4.5)$$

де значення стандартного нормального розподілу F_N знаходять за таблицею стандарт

$$z = 2 \frac{MPE - |\Delta_N|}{U_N}. \quad (4.6).$$

Якщо $p_c \geq 0,975$, ЗВТ вважається придатним за визначенням. При менших значеннях p_c рішення про придатність ЗВТ приймає Замовник.

3) Для метрологічно придатного ЗВТ проводиться перевірка виконання E_n критерія [102]:

$$E_n = \frac{|\Delta_{N-1} - \Delta_N|}{\sqrt{U_{N-1}^2 + U_N^2}} \leq 1. \quad (4.7)$$

Якщо критерій (4.7) виконується, то лабораторія може прийняти рішення про збільшення інтервалу калібрування на один ступінь вище первісного з ряду, наведеного в [100].

4.5 Валідація (верифікація) методик калібрування

Лабораторія має використовувати прийнятні методики та процедури для всієї лабораторної діяльності і, де це доречно, для оцінювання невизначеності вимірювання, а також статистичних методів для аналізування даних [43], пп. 7.2.1.1.

Лабораторія до початку використання методик має переконатися, що вони можуть бути правильно виконані (верифікувати методику) доведенням того, що очікувані результати можуть бути досягнуті. Записи про верифікацію потрібно зберігати [43], пп. 7.2.1.5.

Лабораторія має проводити валідацію нестандартизованих методик, методик, розроблених лабораторією, та стандартизованих методик, застосовуваних поза сферою їх використання, або модифікованих [43], пп. 7.2.2.1.

Прийоми, використовувані для валідації (верифікації) методик, можуть бути одним із або поєднанням таких:

- а) калібрування чи оцінювання систематичної похибки та прецизійності з використанням еталонів або референтних матеріалів;
- б) систематичне оцінювання чинників, що впливають на результат;
- с) перевіряння стійкості методу випробування через змінення контрольованих параметрів, таких як температура в інкубаторі, дозований об'єм;

d) порівняння з результатами, отриманими за іншими валідованими методами;

e) міжлабораторні порівняння;

f) оцінювання невизначеності результатів вимірювання на основі розуміння теоретичних принципів методу та практичного досвіду відбирання зразків або застосування методу випробування.

В залежності від обраного методу валідації обирають необхідні валідаційні характеристики. Типовими характеристиками при валідації методик аналітичних методик є наступні: прецизійність, зміщення, лінійність, поріг виявлення, лінійність, стійкість, селективність [77]. В інших документах цей перелік дещо інший, причому у всіх зазначається, що вибір необхідного набору характеристик з перелічених залежить від конкретного методу, що валідується. При валідації методик калібрування у якості валідаційних характеристик доцільно обрати метрологічні характеристики ЗВТ, які указуються в його сертифікаті калібрування.

При валідації (верифікації) методик калібрування омметрів, здійснюють повторне калібрування за методикою лабораторії відкаліброваного раніше омметра зі значеннями зсуву $\hat{\Delta}_{cert}$ та розширеної невизначеності U_{cert} , зазначеними в його сертифікаті калібрування [48]. Для встановлення придатності методики слід використати формулу:

$$E_n = \frac{|\hat{\Delta}_{lab} - \hat{\Delta}_{cert}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{cert}^2}}, \quad (4.8)$$

в якій $\hat{\Delta}_{lab}$ і U_{lab} – відповідно значення зсуву еталонного ВП та його розширена невизначеність, які були одержані в результаті застосування методики калібрування до еталонного ВП в КЛ.

При валідації (верифікації) методик калібрування МЕО, здійснюють повторне калібрування за методикою лабораторії відкаліброваної раніше МЕО з дійсними значеннями міри \hat{X}_{cert} і розширеної невизначеності U_{cert} ,

зазначеними в її сертифікаті калібрування [48]. Для встановлення придатності методики слід використати формулу:

$$E_n = \frac{|\hat{X}_{lab} - \hat{X}_{cert}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{cert}^2}}, \quad (4.9)$$

в якій \hat{X}_{lab} і U_{lab} – відповідно значення еталонної МЕО та його розширена невизначеність, які були одержані в результаті застосування методики калібрування до еталонної МЕО в КЛ.

Якщо $E_n \leq 1$ в усьому діапазоні зміни значення X_s , у заданому діапазоні зміни впливових величин і заданих параметрах навколишнього середовища, методика є придатною до використання, про що слід вказати в протоколі валідації (верифікації).

Результати оцінки придатності (валідації), процедура, використана для валідації та рішення про придатність (або непридатності) методу, який був застосований для цільового використання повинні оформлятися в вигляді протоколу валідації.

Протокол валідації має містити наступну інформацію [47]:

- 1) ідентифікація методики;
- 2) сфера застосування;
- 3) робочий інтервал та дослідження валідаційних характеристик, а також методів та засобів їх визначення;
- 4) дані, результати визначення характеристик методики;
- 5) процедури, які використані для обробки даних;
- 6) оцінки, інтерпретації, думки;
- 7) використані джерела літератури;
- 8) інформація про персонал, який проводив валідацію;
- 9) період проведення валідації;
- 10) прізвище, дата, підпис того, хто проводив валідацію;
- 11) ідентифікація звіту, інформація про авторів та час його публікації.

Висновки до розділу 4

В цьому розділі розглянуто особливості забезпечення простежуваності вимірювань електричного опору, а саме: основні засади процесу відтворення одиниці електричного опору за допомогою еталона Ома на квантовому ефекті Холла і масштабування одиниці електричного опору на державному первинному еталоні України для подальшої передачі робочим еталонам.

Наведено процедуру оцінювання відповідності ЗВТ електричного опору метрологічним вимогам за результатами їх калібрування.

Розглянуто існуючі методи корекції міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювань та запропоновано удосконалений підхід до корекції міжкалібрувальних інтервалів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача удосконалення методик калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору шляхом розробки процедур оцінювання невизначеності вимірювань на основі методу ексцесів, підвищення якості і ефективності виконання процесу калібрування засобів вимірювання та відтворення електричного опору шляхом врахування особливостей калібрування цих ЗВТ.

В дисертації були отримані наступні основні результати:

1) Проведено аналіз основних існуючих засобів вимірювань та відтворення значень електричного опору та методів їх калібрування і оцінювання невизначеності вимірювань. На основі аналізу базового алгоритму GUM та його недоліків, запропоновано застосування методу ексцесів для отримання достовірних оцінок невизначеності вимірювань під час калібрувань засобів вимірювання та відтворення електричного опору.

2) Розроблено процедури оцінювання невизначеності на основі методу ексцесів при калібруванні засобів вимірювання та відтворення електричного опору з метою удосконалення існуючих методик калібрування, складено бюджети невизначеності.

3) Експериментально та за допомогою численного моделювання перевірено розроблені процедури оцінювання невизначеності вимірювань шляхом порівняння з результатами оцінок невизначеності отриманих методом Монте-Карло. Розбіжності між оцінками розширеної невизначеності, отриманими методом ексцесів та ММК не перевищили $\pm 2,5\%$

4) Запропоновано алгоритм визначення розширеної невизначеності веб-додатком NIST Uncertainty Machine для відсутнього рівня довіри 0,9545;

5) Отримано вирази для оцінювання невизначеності поправок на всі складові похибки відліку для лінійної та нелінійної шкал омметра.

6) Запропоновано алгоритм оцінювання числового значення вимірюваного опору за нелінійною шкалою омметра. Виконана апроксимація

нелінійної шкали омметра В7-15, на основі якої отримані формули, які дозволяють виконувати обчислення вимірюваного значення опору у випадку потрапляння стрілки омметра між відмітками його шкали. Розроблений алгоритм придатний при використанні також інших типів вимірювальних приладів з нелінійною шкалою.

7) Вперше розроблена методика ідентифікації не поліноміальних калібрувальних залежностей з урахуванням інструментальних невизначеностей ЗВТ.

8) Удосконалена методика корегування міжкالیбрувального інтервалу ЗВТ за результатами їх перекалібрувань.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи наступне:

- на основі методу ексцесів розроблені бюджети невизначеності вимірювань, які можуть слугувати основою для створення програмних засобів для автоматизації оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні всіма методами калібрування ЗВТ електричного опору;

- розроблено методики визначення міжкالیбрувального інтервалу та оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування ЗВТ в рамках НДДКР 20-04 (державний реєстраційний номер 0121U107763) для ТОВ “Калібрувальна лабораторія “Метрологія”;

- розроблено методики калібрування омметрів та мір електричного опору для калібрувальної лабораторії Приватного підприємства “Науково-виробничий центр оцінки відповідності “Юг”;

- методика ідентифікації не поліноміальної калібрувальної залежності з урахуванням інструментальних невизначеностей ЗВТ впроваджена в навчальний процес на кафедрі ІВТ ХНУРЕ, де вона використовується під час виконання курсової роботи за курсом “Основи метрології та вимірювальної техніки”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zaharov I., Botsiura O., Semenikhin V. Study of reading errors at calibrating analog ohmmeters // Ukrainian Metrological Journal. 2024. No. 1. P. 17–22, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300870>.
2. Igor Zakharov, Olesia Botsiura, Oleksandr Zakharov, Iryna Zadorozhna, Valerii Semenikhin, Oleg Novoselov. Main stages of calibration of measuring instruments // Ukrainian Metrological Journal. 2023. No. 3. P. 9–15, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291862>.
3. Igor Zakharov, Valerii Semenikhin, Oleksandr Zakharov, Svitlana Shevchenko. Features of measurement uncertainty evaluation during calibration of digital ohmmeters // Ukrainian Metrological Journal. 2023. No. 2. P. 22–27, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2023.286713>.
4. Zakharov I., Neyezhnikov P., Semenikhin V., Warsza Z. Measurement Uncertainty Evaluation of Parameters Describing the Calibrated Curves // USA, Philadelphia, May 23-27, 2022. In book “Advances in Intelligent Systems and Computing”, Vol. 1427, Springer, 2022, pp. 391-398, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-03502-9_38.
5. Zakharov I., Botsyura O., Semenikhin V. Method of kurtosis in estimating the measurement uncertainty during calibration of the electrical resistance measures using a potentiometer // Ukrainian Metrological Journal, 2021, No 2, 30-34, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2021.236078>.
6. Zakharov I., Botsiura O., Semenikhin V., Fomenko V. Considering of the input quantities distributions in the procedure for measurements uncertainty evaluating on the example of resistance box calibration // Ukrainian Metrological Journal, 2020, No 4, c. 3-8, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2020.224189>.
7. Zaharov I., Botsiura O., Semenikhin V. Measurement uncertainty evaluation by kurtosis method at calibration of electrical resistance standards using a comparator // Ukrainian Metrological Journal. 2020. No. 1. P. 12–16, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2020.204166>.

8. Zakharov I.; Botsiura O.; Zadorozhna I.; Semenikhin V.; Diakov D.; Grokhova G., "Measuring Instruments Calibration: Advanced Realisation of Key Elements" 2023 XXXIII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6. IEEE, doi: 10.1109/MMA59144.2023.10317918.

9. I. Zakharov and V. Semenikhin, "Procedure for Determining the Inter-Calibration Interval of Measuring Instruments," 2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-4. IEEE, doi: 10.1109/MMA55579.2022.9993188.

10. Semenikhin V., Zakharov I. The influence of uncertainty on the choice of the calibration interval of measuring instruments // Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects (UM-2022): Thesis of report XIX International Scientific and Technical Seminar, Sofia, Bulgaria, December 7-8, 2022, pp. 35-36.

11. Захаров И.П., Семенихин В.С., Фоменко В.Д. Корректировка межкалибровочного интервала средства измерений по результатам перекалибровок // Theses of reports XVIII International Scientific and Technical Seminar "Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects", Kharkov, December 13-14, 2021, pp. 27.

12. I. Zakharov, P. Neyezhnikov and V. Semenikhin, "Identification of Non-Polynomial Calibration Dependence Accounting for Instrumental Uncertainties of Measuring Instruments" 2021 13th International Conference on Measurement, Bratislava, Slovakia, 2021, pp. 151-154. (*Scopus*).

13. Захаров И.П. Оценивание неопределенности измерений методом эксцессов при калибровке мер электрического сопротивления с помощью потенциометра / И. П. Захаров, О. А. Боцюра, В. С. Семенихин // Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2021). Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 20-21 травня 2021, Харків, 2021. - С. 32.

14. Семенихин В.С. Процедура оценивания неопределенности измерений при калибровке магазина сопротивления / В.С. Семенихин,

В.Д.Фоменко, научний керівитель – професор Захаров І.П. // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті: матеріали 25-го Міжнар. молодіжн. форуму, 20-22 квітня 2021 р. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – Т. 4. – С. 137–138.

15. Семеніхін В.С. Шляхи підвищення продуктивності процесу калібрування цифрових мультиметрів / В. С. Семеніхін // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 24-го Міжнар. молодіж. форуму, 7-9 квіт. 2020р. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – Т. 4. – С. 180-181.

16. Анікін В.В., Колбасін О.І., Маслова Н.М., Коробчанська О.І., Семеніхін В.С. Масштабування одиниці електричного опору в державному первинному еталоні України // "Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції “Меторологія та вимірювальна техніка” (МЕТРОЛОГІЯ–2020). Український метрологічний журнал, 2А, 2020, с. 44.

17. Семеніхін В.С. Аналіз та перспективи діяльності наукового центру електромагнітних вимірювань // "Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції “Меторологія та вимірювальна техніка” (МЕТРОЛОГІЯ–2020). Український метрологічний журнал, 2А, 2020, с. 50.

18. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Метрологія та вимірювання: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. - 292 с.

19. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення. З Поправкою (ПС № 8-96). [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1994.

20. Захарченко В.В. Метрологія та основи вимірювань : навч. посіб. / В.В. Захарченко. – Київ : Академперіодика, 2018. – 288 с.

21. Грицак, Р., Яворський, А. (2023). Огляд сучасного стану законодавчого регулювання, технологій та засобів вимірювальної техніки у сфері вимірювання якості електричної енергії. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 251–264.

22. М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін., Основи метрології та вимірювальної техніки: у двох томах, Т. 2. Вимірювальна техніка; за ред. проф. Б. Стадника, Львів, Україна: Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2005.

23. Основи метрології та електричних вимірювань. Частина I : конспект лекцій / В. В. Кухарчук – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 148 с
24. Пальчиков, О. О. Основи метрології та електромагнітних вимірювань : навч. посібник / О. О. Пальчиков. – Миколаїв : НУК, 2023. – 192 с.
25. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / [Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В.] –Вінниця : ВНТУ, 2011. – 521 с.
26. Захарченко, О. С. Основи метрології. Конспект лекцій: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / О. С. Захарченко, В. П. Смирнов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 130 с.
27. Величко О. М., Коломієць Л. В., Гордієнко Т. Б. Основи метрології та метрологічна діяльність. – Херсон: Олді-плюс, 2021. – 576 с.
28. Захаров И.П. Калибриране не средства за измерване. Учебно помагало. - София: Софттрейд, 2022. – 92 с.
29. Основи метрології та електричні вимірювання [Текст] : навч. посіб. / [М. М. Дорожовець та ін.] ; за наук. ред. д-ра техн. наук, проф. Б. І. Стадника ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2011. - 370 с.
30. Метрологія та вимірювальна техніка [Текст]: підручник / [Є. С. Поліщук та ін.] ; за ред. проф. Є. С. Поліщука ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - 2-е вид., переробл. і допов. - Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2012. - 534
31. Метрологія та вимірювання [Текст] : навч. посіб. / [Дорожовець М. М. та ін.] ; за наук. ред. д-ра техн. наук, проф. Б. І. Стадника ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2012. - 309 с.
32. Нестерчук Д.М., Квітка С.О., Галько С.В. Основи метрології та засобів вимірювання. Мелітополь :Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017.
33. Клименко М.О., Скрипчук П.М. Стандартизація і сертифікація в екології : підручник. Рівне: УДУВГп, 2003. - 202с.
34. Метрологія, стандартизація і сертифікація в екології: Підручник / Клименко М. О., Скрипчук П. М. – Київ.: Видавничий центр «Академія», 2006. – 368 с.
35. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології:

конспект лекцій/ Д.М.Нестерчук. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. - 256 с.

36. Підручник: Метрологія та вимірювальна техніка / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко. Друге видання, доповнене та перероблене. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 544 с.

37. Основи метрології: навчальний посібник / автори.: І.В. Солтис, О.В. Деревянчук, Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.

38. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Ігнатенко О.Г., Войтович О.П. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 151 с.

39. Дудюк Д.Л., Максимів В.М., Оріховський Р.Я. Електричні вимірювання: Навчальний посібник. – Львів: Афіша, 2003. – 272.

40. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) – 3rd Edition. OIML, 2007. 175 p.

41. Law of Ukraine No. 1314-VII “On metrology and metrological activity”. Bulletin of the Verkhovna Rada, 2014, no. 30, article 1008 (in Ukrainian).

42. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. 2017. 28 p.

43. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. JCGM, 2008. 90 p.

44. RMG 29-2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. 2013. 60 p.

45. OIML G 19:2017. The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology. OIML, 2017. 72 p.

46. IEC 60050-300:2001. International Electrotechnical Vocabulary – Electrical and electronic measurements and measuring instruments – Part 311: General terms relating to measurements.

47. ISO/IEC 17025:2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. 36 p.

48. Zakharov I.P., Vodotyka S.V., Shevchenko E.N. Methods, models, and

budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, issue 4, pp. 387–399. doi: 10.1007/s11018-011-9737-5.

49. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM, 2008. 134 p.

50. EA-4/02 M:2013. Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration. EA, 2013. 75 p.

51. Zakharov I.P., Botsyura O.A. Calculation of Expanded Uncertainty in Measurements Using the Kurtosis Method when Implementing a Bayesian Approach. *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, issue 4, pp. 327–331.

52. Основи метрології та електричних вимірювань [Електронне видання]: навч. посіб. / Д.Л. Лавренова, В.М. Хлистов. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 123 с.

53. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний підручник / За заг. ред. Н.А. Яремчук. – К: Видавництво «Політехніка», 2012 - 266.

54. Нестерчук Д.М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.

55. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / [Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В.]. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

56. Ціделко В.Д., Яремчук Н.А., Затока С.А., Бурченков Г.К., Шведова В.В., Стасевич В.А. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний підручник / За заг. ред. Н.А. Яремчук. – К: Видавництво «Політехніка», 2012. - 266 с.

57. Навчальний посібник до самостійного вивчення курсу "Основи метрології і електричних вимірювань" для студентів спеціальності 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” денної та заочної форм навчання. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. - 141 с.

58. Основи метрології: [Електронний ресурс]: навч. посіб. / В. У. Ігнаткін, О. В. Томашевський, В. М. Матюшин – Електрон. дані. – Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, 2017.

59. Топольник В. Г. Метрологія, стандартизація, сертифікація і управління якістю [Текст]: навчальний посібник / В. Г Топольник, М. А Котляр. – Львів : Магнолія, 2009. – 212 с.

60. Метрологія, стандартизація і сертифікація. Підручник /За заг. ред. В.В.Тарасової. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 264 с.

61. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань. Навч. посіб. — К.: Знання-Прес, 2003. - 180 с.

62. Головка Д. Б., Реґо К. Г., Скрипник Ю. О. Основи метрології та вимірювань: Навчальний посібник. — К.: Либідь, 2001. - 408 с.

63. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Ю.В. Гнусов, В.В. Тулупов, В.М. Пересічанський; Харк. нац. ун-т внутр. справ, 2019. - 125 с.

64. Smith M. Classification of Measurement Methods in the Field of Metrology // Journal of Physics: Conference Series.exclamation – 2022, Vol. 2258, No. 1. – P. 012005.

65. Васілевський О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань: навчальний посібник / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 172 с.

66. Захаров И. П., Дяков Д.И. Методи за получаване на надеждни оценки на неопределеността на измерване. Монография. – София: Софттрейд, 2024. – 60 с.

67. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю (навч. посіб-ник) / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219 с.

68. Методика обґрунтування рівнянь вимірювань та оцінки методичної складової похибки (невизначеності) результатів вимірювань: МІ 13.002- 2003. – Офіц. вид. – Харків: ХДНДІМ, 2003. – 11 с.

69. Ю.Ф. Павленко, І. П. Захаров. Забезпечення єдності вимірювань: навчальний посібник. Частина 1. – Харків : ТОВ «Оберіг», 2023. – 172 с.
70. Hall, B. D., & White, D. R. (2020). An Introduction to Measurement Uncertainty (с. 50). Measurement Standards Laboratory of New Zealand.
71. Основи теорії невизначеності вимірювань : підручник / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 230 с.
72. Коцюба А. Процедура оцінювання невизначеності вимірювання випробувальної лабораторії / А. Коцюба, В. Новіков // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2003. – № 1. – С. 39–41.
73. Чалый В.П. Неопределенность и погрешность, их сходство, различие и употребление в разных метрологических процедурах / В.П. Чалый // Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. – вип. 7(56). Невизначеність вимірювання: наукові, нормативні та прикладні аспекти, 2006. – С. 82–86
74. М. Дорожовець, Опрацювання результатів вимірювань, Львів, Україна: Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2007.
75. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. JCGM, 2012. 64 p.
76. Zakharov I., Neyezhmakov P., Botsiura O. Verification of the Indicating Measuring Instruments Taking into Account their Instrumental Measurement Uncertainty. Measurement science review, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 269–272.
77. EURACHEM/CITAC Guide CG 4. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Third Edition. QUAM:2012.P1. 133 p.
78. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – Geneva: ISO, 1993. – 101 p.
79. Zakharov I.P., Vodotyka S.V. Application of Monte Carlo simulation for the evaluation of measurements uncertainty // Metrology and Measurement systems, 2008, vol., XV, Number 1 p. 118 – 123.

80. Zakharov I., Neyezhmakov P., Botsiura O. Expanded Uncertainty Evaluation Taking into Account the Correlation Between Estimates of Input Quantities // Ukrainian Metrological Journal, 2021, No 1, pp. 4-8.

81. Zakharov I.P., Botsiura O.A., Neyezhmakov P.I. Study of approaches to determining the required number of multiple observations // Ukrainian Metrological Journal, 2022, No 3, 9-13.

82. Боцюра О.А., Захаров І.П., Неежмаков П.І. Основні положення Настанови з подання невизначеності вимірювань на основі байєсівського підходу // Український метрологічний журнал, 2019, №2, с. 3-9.

83. Zakharov I., Botsiura O. Estimation of expanded uncertainty in measurement when implementing a Bayesian approach // Measurement Techniques, 2018, Volume: 61, Issue: 4, pp. 342-346.

84. NIST uncertainty machine. Available at: <https://uncertainty.nist.gov/>

85. COOMET R/GM/35:2022 Expression of the expanded measurement uncertainty (method of kurtosis)

86. Volkov O.O., Zakharov I.P. Measurement uncertainty evaluation at resistance measures calibrating electrical by the indirect method // Information processing systems, 2013, Issue 3 (110), pp. 164 – 166 (in Russian).

87. M3003. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. Edition 3. UKAS, 2012. 82 p.

88. Zakharov I.P., Pohybko R.V., Volkov O.O. Exploration of a measuring uncertainty, associated with nonlinear scale reading. Information processing systems, 2014, vol. 3(119), pp. 82–86 (in Russian).

89. Захаров І.П. Порівняльний аналіз характеристик точності вимірювань. Харків: Оберіг, 2019, 100 с

90. RMG 115-2019 State system for ensuring the uniformity of measurements. Calibration of measuring instruments. Algorithms for processing measurement results and evaluating uncertainty.

91. Cage, M. E., Klitzing, K., Chang, A. M., Duncan, F., Haldane, M., Laughlin, R. B., Thouless, D. J. The quantum Hall effect. // Springer Science &

Business Media, 2012.

92. Von Klitzing, Klaus. Developments in the quantum Hall effect // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 363.1834 (2005): 2203-2219.

93. Hartland, A. (1992). The quantum Hall effect and resistance standards // Metrologia, 29(2), 175.

94. Brown R. Implementation of a Commercial Quantum Hall Resistance System / R. Brown // Cal Lab. – Oct., Nov., Dec. 2006. – P. 39.

95. Павленко Ю.Ф., Сидоренко Г.С., Анікін В.В. та ін. Державний первинний еталон одиниці електричного опору // Український метрологічний журнал – 1998 – вип. 4. – С. 26 – 28.

96. Klitzing K., Dorda G., Pepper M. New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V. 45. – № 6. – P. 494 – 497.

97. Melcher J., Warnecke P. and Hanke R. Comparison of precision ac and dc measurements with the quantized Hall resistance. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1993, 42, 292–4.

98. Забезпечення єдності електрорадіовимірювань: навчальний посібник; за ред. проф. Ю. Ф. Павленка. – Х.: Вид-во «Підручник НТУ ХП». – 232 с.

99. OIML G 19:2017. The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology. OIML, 2017. 72 p.

100. ДСТУ-Н РМГ 74:2009 Метрологія. Методи визначання міжповіркового та міжкалібрувального інтервалів засобів вимірювання (РМГ 74-2004, IDT).

101. ДСТУ ІЛАС-G 24/OIML D 10:2013 Метрологія. Настанови щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (ІЛАС-G 24/OIML D 10:2007, IDT).

102. PTB Q5 Guide 2 Mass Laboratory.