

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 1(87), 2021

Науково-виробничий журнал

Scientific and production journal

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
Державне підприємство
«Всеукраїнський державний
науково-виробничий центр
стандартизації, метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів»
(ДП «Укрметртестстандарт»),
ТОВ Виробничо-комерційна
фірма (ВКФ) «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску п'ятнадцятий
Передплатний індекс 92386

Головний редактор

Большаков В.Б., д. т. н., с. н. с.

Редакційна колегія:

Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Захаров І.П., д. т. н., проф.
Коломієць Л.В., д. т. н., проф.
Косач Н.І., д. т. н., проф.
Кошева Л.О., д. т. н., проф.
Кошовий М.Д., д. т. н., проф.
Кучерук В.Ю., д. т. н., проф.
Кухарчук В.В., д. т. н., проф.
Назаренко Л.А., д. т. н., проф.
Пістун Є.П., д. т. н., проф.
Семенець В.В., д. т. н., проф.
Середюк О.Є., д. т. н., проф.
Сичикова Я.О., д. т. н.
Туз Ю.М., д. т. н., проф.
Іноземні члени редколегії:
Tadeusz Skubis, dr hab. inż., prof.
(Польща)
Zygmunt Warsza, doc., dr inż. (Польща)
Михалченко В.М., к. т. н. (Казахстан)

Експертна рада:

Кузьменко Ю.В., к. т. н., с. н. с.
Петришин І.С., д. т. н., проф.
Рожнов М.С., к. х. н., с. н. с.
Сурду М.М., д. т. н., проф.

Редакційна група:

Винокуров Л.І., науковий редактор —
відповідальний секретар
Проненко М.П., модератор сайту,
дизайнер
Зайцев Ю.О., дизайнер-верстальник

Адреса редакції:

61001, Харків, вул. Рижівська, 11, к. 2;
Тел.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
<http://www.amu.in.ua/journal1>
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр-т. Гагаріна, 94-А, кв. 35;
Свідцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 15.03.2021.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 7.

© «Метрологія та прилади», 2021

Журнал зареєстровано
у Міністерстві юстиції України,
свідцтво серія КВ № 22796-12696ПР
від 03.07.2017;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, в яких
можуть публікуватися результати
дисертаційних робіт на здобуття наукових
ступенів доктора наук, кандидата наук
та ступеня доктора філософії (категорія Б),
затвердженого Наказом Міністерства освіти
і науки України № 409 від 17.03.2020
Журнал включено до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013
ICV 2018 = 56,77

The Journal is Registered
in Ministry of Justice of Ukraine,
Certificate series KB № 22796-12696PR
dated 03.07.2017;
is included to the List of scientific
professional publications of Ukraine,
in which the results of dissertations
for the degree of doctor of sciences,
candidate of sciences and the degree
of doctor of philosophy (category B),
may be published, approved by the order
of the Ministry of Education and Science
of Ukraine No. 409 dated 17.03.2020
The journal is included in the International
Scientific Databases Index Copernicus, Letter
dated 08.03.2013
ICV 2018 = 56,77

Co-founders:

Kharkiv National University
of Radio Electronics (KNURE);
Public Organization
«Academy of Metrology of Ukraine»;
State Enterprise «Ukrainian State
Research and Production Centre
for Standardisation, Metrology,
Certification and Consumers
Rights Protection»
(SE «Ukrmetrtteststandart»);
LLC Production and Commercial Firm
(PCF) «FAVOR, LTD»

Published since march 2006.
Release year fifteenth
Subscription index 92386.

Chief editor:

Bolshakov V.B., D.Sc. (Eng.), S.Sc.Off.

Editorial board:

Kolomiyets L.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosach N.I., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosheva L.O., D.Sc. (Eng.), prof.
Koshoviy M.D., D.Sc. (Eng.), prof.
Kucheruk V.Yu., D.Sc. (Eng.), prof.
Kukharchuk V.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Nazarenko L.A., D.Sc. (Eng.), prof.
Pistun Ye.P., D.Sc. (Eng.), prof.
Semenets V.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Serediuk O.Ye., D.Sc. (Eng.), prof.
Sychikova Ya.O., D.Sc. (Eng.)
Tuz Yu.M., D.Sc. (Eng.), prof.
Volodarskyi Ye.T., D.Sc. (Eng.), prof.
Zakharov I.P., D.Sc. (Eng.), prof.

Foreign members of the editorial board:

Tadeusz Skubis, prof. dr hab. inż.
(Poland)
Zygmunt Warsza, doc., dr inż. (Poland)
Mykhalchenko V.M., Ph.D.
in Engineering Science (Kazakhstan)

Advisory Board:

Kuzmenko Yu.V., Ph.D. (Eng.), S.Sc.Off.,
Petryshyn I.S., D.Sc. (Eng.), prof.
Rozhnov M.S., Ph.D. (Chem.), S.Sc.Off.
Surdu M.M., D.Sc. (Eng.), prof.

Editorial Team:

Vynokurov L.I., Scientific Editor,
Executive Secretary
Pronenko M.P., site moderator, designer
Zaitsev Yu.O., maker-up designer

Editorial Address:

61001, Kharkiv, st. Ryzhivska, 11, r. 2;
tel.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665
e-mail: metrolog-prylady@ukr.net
<https://www.amu.in.ua/journal1>
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

Publisher and manufacturer:

PCF «Favor LTD»
61140, Kharkiv,
pr-t. Gagarin, 94-A, sq. 35;
Certificate of inclusion in the State
Register of Publishers, Manufacturers
and Distributors of Publishing Products,
series XK № 90 dated 17.12.2003.

Signed for printing dated 15.03.2021
Format 60 × 84/8. Paper is coated.
Conditional printed sheets 8.43.
Accounting and publishing sheets 7.13.
Offset printing. Circulation 400 copies
Order number 7.

ISSN (print) 2307-2180

ISSN (online) 2663-9564

DOI: 10.33955/2307-2180

© «Metrology and Instruments», 2021

ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Попруга Ю. М.

Департамент технічного регулювання та метрології Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України: підсумки метрологічної діяльності за 2020 рік 3

TRENDS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

Popruga Yu. M.

Department of Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Development of Economy, Trade and Agriculture of Ukraine: Results of metrological activity for 2020

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

Сергієнко Р. П.

Методи оцінки впливу домішок на температуру реперних точок 5

METHODS AND PROCEDURES

Sergiienko R. P.

Methods for Assessing the Effect of Impurities on the Fixed Points Temperature

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ

Курський Ю. С., Гнатенко О. С.

Система для виявлення оптичних приладів, заснована на уявленнях фрактальної математики 14

MATHEMATICAL METHODS

Kurskoy Yu. S., Hnatenko O. S.

System for Recognition of Optical Tools, Based on Fractal Mathematic Views

ПРИЛАДИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

Квасніков В. П., Стахова А. П.

Огляд приладів та методів вимірювання та запобігання вібрації 19

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT

Kvasnikov V. P., Stakhova A. P.

Inspection of Devices and Methods of Measurement and Prevention of Vibrations

СИСТЕМИ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Жебка В. В., Анахов П. В.

Моніторинг сталості інформаційно-телекомунікаційної системи й опрацювання заходів захисту від небезпек 23

METROLOGICAL INFORMATION SYSTEMS

Zhebka V. V., Anakhov P. V.

Monitoring the Sustainability of Information and Telecommunication System and Elaboration of Measures to Protect from Dangers

СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

Прокопченко С. В., Воскресенський В. Б.

Аналіз відеовимірювальних систем для контролю виготовлення різнопрофільних деталей 30

CONTROL SYSTEMS

Prokopchenko S. V., Voskresenskiy V. B.

Analysis of Video Measuring Systems for Control the Manufacture of Multi-Profile Parts

ГАЗОВИЙ АНАЛІЗ

Козубовський В. Р., Білак Ю. Ю.

Підвищення селективності інтерферометричних приладів газового аналізу 37

GAS ANALYSIS

Kozubovskyy V. P., Bilak Yu. Yu.

Increasing the Selectivity of Interferometric Gas Analysis Devices

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М.

Використання комбінації методів статистичного аналізу для контролю якості роботи датчика ваги KELI QS-D у системі зважування автотранспорту 42

STATISTICAL ANALYSIS

Hryhorenko I. V., Kondrashov S. I., Hryhorenko S. M.

Using a Combination of Statistical Analysis Methods to Quality Control of the KELI QS-D Weight Sensor in the Automotive Weighing System

ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ

Слива Ю. В., Походило Є. В.

Застосування імпедансного методу для визначення нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах 49

APPLICATION AND EXPLOITATION

Slyva Yu. V., Pokhodylo E. V.

Application of Impedance Method for Determination of Sodium Nitrite in Meat Foods

ХІМІЧНА МЕТРОЛОГІЯ

Калинюк М. М., Козін Р. В., Калинюк О. М., Пузрін О. Л., Моссоковська І. А.

Аналіз гідриду титану на вміст гідрогену та домішок кисню, нітрогену, карбону 57

CHEMICAL METROLOGY

Kalyniuk M. M., Kozin R. V., Kalyniuk O. M., Puzrin A. L., Mossokovska I. A.

Analysis of titanium hydride on hydrogen and admixtures oxygen, nitrogen, carbon contents

ПРАКТИЧНА МЕТРОЛОГІЯ

Костюков І. О.

Особливості розрахунку дисперсії результатів визначення часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань 65

PRACTICAL METROLOGY

Kostiukov I. O.

Peculiarities of Calculation of Variance of the Results of Determination of Partial Capacitances of Insulation in Three-Core Power Cables by Applying Aggregate Measurements

ВІТАЄМО ЮВІЛЯРІВ

До 80-річчя Леоніда Андрійовича Назаренка 72

WELCOME

To 80th anniversary of L.A. Nazarenko

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.3-4

УДК 381.1.2

ДЕПАРТАМЕНТ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА МЕТРОЛОГІЇ МІНІСТЕРСТВА РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ: ПІДСУМКИ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЗА 2020 РІК

**Department of Technical Regulation and Metrology
of the Ministry of Development of Economy,
Trade and Agriculture of Ukraine:
Results of metrological activity for 2020**

Ю. М. Попруга, заступник директора департаменту,
начальник управління метрології,
Департамент технічного регулювання та метрології
Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського
господарства України, м. Київ,
e-mail: dtr@me.gov.ua

Yu. M. Popruga, Deputy Director of the Department,
Head of Metrology Department,
Department of Technical Regulation and Metrology
of the Ministry of Development of Economy,
Trade and Agriculture of Ukraine, Kyiv,
e-mail: dtr@me.gov.ua

У 2020 році в сфері метрології та метрологічної діяльності було **прийнято такі нормативно-правові акти:**

- Закон України від 05.11.2020 № 998-IX «Про приєднання України до Конвенції про заснування міжнародної організації законодавчої метрології»;
- постанова Кабінету Міністрів України від 12.02.2020 № 83 «Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 24 лютого 2016 р. № 117»;
- постанова Кабінету Міністрів України від 12.02.2020 № 82 «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження уповноваженими науковими метрологічними центрами, державними підприємствами, які належать до сфери управління центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності, та провадять метрологічну діяльність, повірочними лабораторіями господарської діяльності з проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) Міністерством розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства»;
- постанова Кабінету Міністрів України від 29.07.2020 № 661 «Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2015 р. № 1152»;
- наказ Мінекономіки від 20.06.2020 № 1176 «Про внесення зміни до пункту 1 Правил застосування одиниць вимірювання і написання назв та позначень одиниць вимірювання і символів величин», зареєстрований у Мін'юсті 03.07.2020 за № 617/34900;

- наказ Мінекономіки від 30.06.2020 № 1242 «Деякі питання щодо видачі свідоцтва про уповноваження на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології», зареєстрований у Мін'юсті 08.09.2020 за № 862/35145;

- наказ Мінекономіки від 10.08.2020 № 1518 «Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів», зареєстрований у Мін'юсті 13.10.2020 за № 1000/35283;

- наказ Мінекономіки від 08.10.2020 № 2004 «Про затвердження примірних (зразкових) форм деяких документів, що додаються до заяви про уповноваження на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології».

Загальний обсяг виконаних метрологічних робіт державними підприємствами та установами, які здійснюють діяльність у сфері метрології та належать до сфери управління Мінекономіки (далі — державні підприємства), за 2020 рік **становить 964402,4 тис. гривень** (2019 рік — 953378,5 тис. гривень), що становить **70,7 % від загального обсягу всіх виконаних робіт.**

Державними підприємствами та установами у звітному році:

- **придбано 309 еталонів** для повірки засобів вимірювальної техніки (далі — ЗВТ) на загальну суму 30735,8 тис. гривень (у 2019 році придбано 444 еталони на загальну суму 75673,4 тис. гривень);



■ **повірено 3894,4 тис. одиниць ЗВТ** (у 2019 році — 4845,1, 9 тис. одиниць ЗВТ);

■ **проведено калібрування 124,8 тис. одиниць ЗВТ і еталонів** (у 2019 році — 113,3 тис. одиниць ЗВТ і еталонів).

У 2020 році науковими метрологічними центрами (ННЦ «Інститут метрології», ДП «Укрметртестстандарт», ДП НДІ «Система», ДП «Івано-Франківськ-стандартметрологія») **виконувалися 22 науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи** (далі — НДДКР) за бюджетною програмою КПКВК 1201220 «Наукова і науково-технічна діяльність у сфері економічного розвитку, стандартизації, метрології та метрологічної діяльності» та відповідно до плану НДДКР у сфері метрології на 2020 рік, затвердженого наказом Мінекономіки від 18.05.2020 № 904, **на загальну суму 13134,4 тис. гривень** за такими напрямками:

♦ прикладні наукові дослідження у сфері метрології (1 НДР);

♦ виконання науково-технічних (експериментальних) розроблень зі створення та вдосконалення державних еталонів, утримання та експлуатації державних первинних еталонів, звірення державних первинних еталонів з національними еталонами інших держав і міжнародними еталонами (14 НДДКР);

♦ забезпечення функціонування Служби єдиного часу і еталонних частот, Служби стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів, Служби стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів (3 НДР);

♦ збереження та функціонування національної еталонної бази (державні еталони та лінійно-геодезичний полігон) (4 НДР).

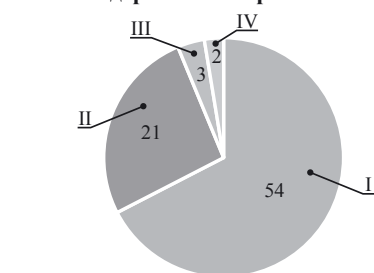
Найбільш вагомими результатами виконання НДДКР у 2020 році є завершення робіт щодо:

* **удосконалення державного первинного еталона** одиниць поглинутої дози, потужності поглинутої дози рентгенівського та гамма-випромінень ДЕТУ 12-05-02;

* **створення та атестації стандартних довідкових даних** про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів «Олія кукурудзяна нерафінована. Густина у діапазоні температури 273...373 К», (наказ Мінекономіки від 26.01.2021 № 144).

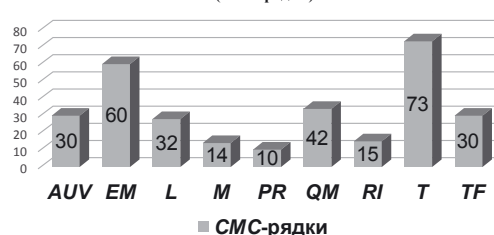
За результатами дослідження стабільності відтворення та зберігання одиниць вимірювання державними первинними еталонами **забезпечено передавання розміру одиниць вимірювання 8317 еталонам**

Кількість державних первинних еталонів



I — ННЦ «Інститут метрології»
II — ДП «Укрметртестстандарт»
III — ДП НДІ «Система»
IV — ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»

Калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС-рядки)



та високоточним ЗВТ, які застосовуються у різних сферах економіки.

Національну еталонну базу (комплекс державних еталонів та лінійно-геодезичний полігон) **включено до Переліку наукових об'єктів, що становлять національне надбання**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19.12.2001 № 1709.

Станом на 31.12.2020 **комплекс державних первинних еталонів складався з 80 державних еталонів та лінійно-геодезичного полігону.**

Ступінь еквівалентності державних первинних еталонів України з національними еталонами інших держав і міжнародними еталонами встановлюється за результатами, які отримані в ході ключових та додаткових звірень. Ці звірення проводяться Консультативними комітетами Міжнародного комітету мір та ваг (CIPM), Міжнародним бюро мір та ваг (BIPM) і регіональними метрологічними організаціями (PMO). Результати звірень (калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС-рядки) публікуються BIPM і зберігаються у Додатку С бази даних ключових звірень (KCDB).

У 2020 році **проведено звірення 3 державних первинних еталонів** (державного первинного еталона одиниць спектральної густини енергетичної яскравості, спектральної густини сили випромінювання та спектральної густини енергетичної освітленості; потужності випромінювання та енергетичної освітленості ДЕТУ 11-06-06, національного державного первинного еталона одиниць звукового тиску в повітряному середовищі НДЕТУ AUV-03-2019, державного первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-15) **з національними еталонами інших держав і міжнародними еталонами.**

Станом на 31.12.2020 у **KCDB опубліковано 306 СМС-рядків України.**

Також у звітному році **забезпечено функціонування:**

- Служби єдиного часу і еталонних частот (СЧЧ);
- Служби стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів (ССЗ);
- Служби стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів (ССДД).

Інформаційні довідки щодо функціонування у 2020 році СЧЧ, ССЗ та ССДД розміщено у мережі Інтернет на сайтах:

▲ ННЦ «Інститут метрології», який визначено Головним центром СЧЧ, науково-методичним центром ССЗ (<http://www.metrology.kharkov.ua>);

▲ ДП «Укрметртестстандарт», який визначено науково-методичним центром ССДД (<http://metrology.kiev.ua>). ■

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.5-13

УДК539.219:536.9.081 УДК536.5:006.91(477)

МЕТОДИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ДОМІШОК НА ТЕМПЕРАТУРУ РЕПЕРНИХ ТОЧОК

Methods for Assessing the Effect of Impurities on the Fixed Points Temperature

Р. П. Сергієнко, кандидат технічних наук,
інженер з метрології 1-ї категорії,
ДП «Харківстандартметрологія», Україна,
e-mail: rimmasergienko474@gmail.com

R. P. Sergiienko, candidate of technical sciences,
metrology engineer of the 1st category,
SE «Kharkivstandartmetrologiya», Ukraine,
e-mail: rimmasergienko474@gmail.com

Відповідно до Положення про Міжнародну температурну шкалу МТШ-90 [1—3] основою для відтворення температурної шкали є реалізація фазових переходів чистих речовин, зокрема фазових переходів твердіння чистих металів. Так, в діапазоні температурної шкали нижче 1234,93 К (961,78 °С) використовуються реперні точки твердіння таких металів як індій, олово, цинк, алюміній та срібло зі застосуванням, відповідно, контактних методів вимірювань температури. В діапазоні вище 1234,93 К застосовуються оптичні, тобто безконтактні методи вимірювань, а реперними точками можуть бути температури твердіння срібла, золота або міді. В ідеальному наближенні температура реперної точки твердіння має характеризувати фазовий перехід чистої однокомпонентної речовини. Проте реальні матеріали не є абсолютно чистими, тобто наявність домішок є джерелом відповідної складової бюджету невизначеності реалізації температури реперної точки, яку необхідно коректно враховувати у процесі розроблення або модернізації первинних національних еталонів одиниці температури, під час їх експлуатації, участі у міжнародних звіреннях та передаванні одиниці температури вторинним та робочим еталонам. Зважаючи на актуальність цього питання, метою цієї роботи є дослідження та аналіз тенденцій у розвитку методів оцінки впливу домішок на вказану складову невизначеності та, як наслідок, на температуру реалізації реперних точок, а саме, реперних точок твердіння чистих металів.

In accordance with the Regulation on ITS-90 [1—3], the basis for reproducing the temperature scale is the implementation of phase transitions of pure substances, in particular phase transitions of solidification of pure metals. So, in the range of the temperature scale below 1234.93 K (961.78 °C) such fixed points of solidification

of pure metals as indium, tin, zinc, aluminum and silver and contact measurement methods are used. In the range above 1234.93 K, optical, that is, non-contact measurement methods are used, and the fixed points can be the solidification temperatures of silver, gold or copper. In an ideal approximation, the temperature of the solidification fixed point should characterize the phase transition of a pure one-component substance. However, real materials are not completely pure. That is, the presence of impurities is a source of the corresponding component of the uncertainty budget in the implementation of the fixed point temperature, which must be correctly taken into account when developing or modernizing primary national standards for the temperature unit, during their operation, participating in international comparisons and transferring the unit of temperature to secondary and working standards. Underestimation of this component can lead to a situation where the temperature difference determined by the National Metrology Institutes (NMI) during international comparisons exceeds the total uncertainty budget of the NMI [6]. The purpose of this work is to study trends in the development of methods for assessing the effect of impurities on the specified component of uncertainty and, as a consequence, on the temperature of realization of fixed points, namely, fixed points of solidification of pure metals. The works that have been carried out in various metrological institutes since the introduction of the ITS-90 have developed and formed certain approaches in relation to these methods [6, 9, 10]. A review and analysis of such methods for assessing the effect of impurities on temperature as the method of the sum of individual contributions of each impurity («SIE»); the method based on the total amount of impurities («OME»); combined method («SIE/OME»); the solidification curve analysis method; the method based on representative comparisons («ERC») are carried out. The conditions under which it is advisable to apply one or another method, and the advantages and disadvantages of each of them are also considered.

Ключові слова: температура, реперна точка, фазовий перехід, крива твердіння, вплив домішок, складова невизначеності.
Keywords: temperature, fixed point, phase transition, solidification curve, influence of impurities, uncertainty component.

ВСТУП

Відповідно до [1—3] основою для відтворення температурної шкали МТШ-90 є реалізація фазових переходів чистих речовин, зокрема фазових переходів твердіння чистих металів. Так, у діапазоні температурної шкали нижче 1234,93 К (961,78 °С) використовуються реперні точки твердіння таких металів як індій, олово, цинк, алюміній та срібло зі застосуванням, відповідно, контактних методів вимірювань температури. В діапазоні вище 1234,93 К відтворення МТШ-90 ґрунтується на здійсненні стану термодинамічної рівноваги між твердою і рідкою фазами чистого металу, що має безпосе-



редній контакт зі стінками порожнини моделі абсолютного чорного тіла, наявність якої передбачає власне конструкція графітового тигля, що містить реперний метал. Такими металами у високотемпературному діапазоні можуть бути срібло, золото або мідь. Графітовий тигель розміщують у робочому просторі випромінювача, температурні режими нагрівання та охолодження якого дозволяють реалізувати фазові переходи та, відповідно, отримати плато плавлення та тверднення реперної речовини, які реєструють оптичними, тобто безконтактними, методами. В ідеальному наближенні температура реперної точки тверднення має характеризувати фазовий перехід чистої однокомпонентної речовини. Проте реальні реперні матеріали не є абсолютно чистими, тобто наявність домішок є джерелом відповідної складової бюджету невизначеності реалізації температури реперної точки [4, 5], яку необхідно коректно враховувати в процесі розроблення або модернізації первинних національних еталонів одиниці температури, під час їх експлуатації, участі у міжнародних звіреннях та передаванні одиниці температури вторинним та робочим еталонам. Зважаючи на актуальність цього питання, метою цієї роботи є дослідження тенденцій у розвитку методів оцінки впливу домішок на вказану складову невизначеності та, як наслідок, на температуру реалізації реперних точок, а саме, реперних точок тверднення чистих металів. Величина вказаної складової може домінувати в бюджеті невизначеності навіть за вмісту домішок у зразках реперних речовин на рівні 1 ppm молярної частки. Недооцінювання цієї складової може призвести до ситуації, коли різниця між температурами, визначеними Національними метрологічними інститутами (НМІ) під час міжнародних звірень, перевищує власне загальний бюджет невизначеності НМІ [6], що, зокрема, демонструють результати звірень ССТ-К3 [7] та ССТ-К4 [8]. Роботи, які виконувалися в різних метрологічних інститутах з моменту введення в дію МТШ-90, розвивали та формували певні підходи стосовно методів оцінки впливу домішок на температуру реалізації фазових переходів [6, 9, 10]. Щодо інтенсивності та динаміки вказаних робіт свідчать об'ємність та змістовність настанови [6], яка містить понад 100 посилань на наукові джерела та входить окремим документом до оновленої редакції МТШ-90 (2018 р.).

ЗВ'ЯЗОК КРИСТАЛОГРАФІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Для оцінки впливу концентрації домішок та їх розподілу між твердою та рідкою фазами на температуру тверднення реперного матеріалу важливо розглянути зв'язок кристалографічних параметрів домішок із термодинамічними величинами [11]. Із бінарної

фазової діаграми для рівноважного стану за низьких концентрацій для кожної домішки необхідно отримати два параметри — рівноважний коефіцієнт k_0^i розподілу домішки i

$$k_0^i = c_s^i / c_l^i, \quad (1)$$

де c_s^i та c_l^i — концентрації молярної частки домішки i у твердій (*solid*) та рідкій (*liquid*) фазах реперного матеріалу в стані термодинамічної рівноваги, відповідно, та похідну залежності температури лінії ліквідусу від концентрації домішки i

$$m_l^i = \frac{\partial T_l}{\partial c_l^i}. \quad (2)$$

За стану термодинамічної рівноваги переходу «тверда речовина-рідина» хімічні потенціали речовини-«господаря» «А» у рідкій (μ_{lA}) та твердій (μ_{sA}) фазах мають бути рівними:

$$\mu_{lA} = \mu_{sA}, \quad (3)$$

де їх загальні вирази:

$$\mu_{lA} = \mu_{lA}^0 + RT \ln \left(\frac{a_{lA}}{a_{lA}^0} \right), \quad (4)$$

$$\mu_{sA} = \mu_{sA}^0 + RT \ln \left(\frac{a_{sA}}{a_{sA}^0} \right), \quad (5)$$

де a — символ хімічної активності; a_{lA}^0 , a_{sA}^0 — стандартні (опорні) значення; R — універсальна газова стала, T — термодинамічна температура. Якщо чиста речовина-«господар» «А» використовується як реперна (еталонна), виконуються такі рівняння:

$$a_{sA}^0 = a_{lA}^0 = 1, \quad (6)$$

$$\Delta \mu_A^0 = \mu_{lA}^0 - \mu_{sA}^0 = \Delta G_{MA}, \quad (7)$$

де ΔG_{MA} — вільна ентальпія плавлення речовини «А». Для ідеальних розчинів хімічна активність a дорівнює концентрації c . У бінарній системі концентрації компонентів «А» та «В» пов'язані як

$$c_{sA} = 1 - c_{sB}, \quad (8)$$

$$c_{lA} = 1 - c_{lB}. \quad (9)$$

Із рівнянь (3)—(7) в цьому випадку випливає:

$$\Delta G_{MA} = RT \ln \left(\frac{1 - c_{sB}}{1 - c_{lB}} \right). \quad (10)$$

За малих концентрацій компонента «В» застосовують таке наближення:

$$\ln \left(\frac{1 - c_{sB}}{1 - c_{lB}} \right) \approx (A_B - c_{sB}). \quad (11)$$

Застосування рівняння Гіббса-Гельмгольца ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$) до плавлення дає:

$$\Delta G_{MA} = \Delta H_{MA} - T\Delta S_{MA}, \quad (12)$$

де ΔH_{MA} — ентальпія плавлення, $\Delta S_{MA} = \Delta H_{MA}/T_{MA}$ — ентропія плавлення (T_{MA} — температура плавлення чистої речовини «А»). Оскільки рівноважний коефіцієнт розподілу компонента «В» визначається рівнянням $k_0^B = c_{sB}/c_{lB}$, рівняння (10)—(12) дають

$$k_0^B = 1 - \frac{\Delta H_{MA}(T_{MA} - T)}{RT_{c_{IB}}T_{MA}}. \quad (13)$$

За малих концентрацій домішки «В» можна припустити, що $T \approx T_{MA}$ та ΔH_{MA} не залежить від концентрації та температури, тобто рівняння (13) можна спростити до:

$$k_0^B = 1 - A \frac{(T_{MA} - T)}{c_{IB}}, \quad (14)$$

де A — перша кріоскопічна стала. Оскільки відношення $(T - T_{MA})/c_{IB}$ практично дорівнює нахилу лінії ліквідуса $m_l^B = \partial T_l / \partial c_{IB}$, отримуємо таке наближене співвідношення:

$$m_l^B = \frac{\partial T_l}{\partial c_{IB}} = - \frac{(1 - k_0^B)}{A}. \quad (15)$$

Як зазначається в [11], вираз (15) для малих концентрацій компонента «В» отримано за таких припущень: (i) розчин є ідеальним, (ii) застосовано наближення (11) за малих концентрацій, (iii) $T \approx T_{MA}$ та (iv) ΔH_{MA} не залежить від концентрації та температури.

Форма кривої фазового переходу може істотно залежати від умов експерименту, особливо від швидкості тверднення, якщо концентрація домішок є суттєвою. Також на форму плато тверднення може впливати тривалість часу, протягом якого реперна речовина була у рідкому стані, та температура рідини до початку процесу тверднення. За умови $k_0^i \neq 1$ розподіл домішок між твердою та рідкою фазами призводить або до збільшення їх концентрації у рідині ($k_0^i < 1$) під час тверднення або до відповідного зменшення ($k_0^i > 1$), що призводить до зменшення температури фазового переходу тверднення. Якщо $k_0^i \leq 0,01$, розчинність домішки у твердій речовині «А» вважають мізерно малою. У рідкісному випадку, коли $k_0^i = 0$, усі домішки залишаються у рідкій фазі розчину. За справедливості закону ідеального розчину та за припущення, що в рідині відсутні градієнти концентрації компонента «В», оскільки компонент-розчинник («господар») твердіє повільно, зниження температури тверднення розчину відносно температури тверднення чистої речовини «А» прямо пропорційне концентрації домішки [6]:

$$T_{pure} - T_{obs} = c_l / A, \quad (16)$$

де T_{pure} — температура тверднення чистої речовини «А»; T_{obs} — температура, що спостерігається під час тверднення розчину; c_l — молярна частка концентрації домішки у рідині; A — перша кріоскопічна стала, яка визначається (див. рівняння (14)) як:

$$A = L / RT_{pure}^2, \quad (17)$$

де L — молярна теплота плавлення; R — універсальна (молярна) газова стала. Отже, чиста тверда фаза реперної речовини «А» залишається у рівновазі з рідкою фазою — розчином реперної речовини та домішки (що є ідеальним випадком), при цьому

концентрація домішки c_l обернено пропорційна фракції F розплавленого розчину, тобто

$$c_l = c_{l1} / F, \quad (18)$$

де c_{l1} — концентрація домішки, коли реперний матеріал є повністю розплавленим ($F = 1$). Підставляючи рівняння (18) у рівняння (16), отримуємо вираз (за кон Рауля):

$$T_{pure} - T_{obs} = c_{l1} / (AF). \quad (19)$$

Отже, для систем, які містять лише домішки із $k_0^i = 0$, графіки залежності температури від $1/F$ демонструють міру концентрації домішок, а екстраполяції до $1/F = 0$ можуть бути застосовано для визначення T_{pure} . Але на практиці рівняння (19) є певним наближенням до реальних умов, оскільки, по-перше, мало домішок мають $k_0^i = 0$, а по-друге, мало ймовірно, що реперна речовина матиме домішки лише з таким значенням рівноважного коефіцієнта розподілу. Тобто такий підхід може недооцінювати зниження температури під час тверднення у зразках матеріалів зі значною концентрацією домішок з $0,1 < k_0^i < 1$ [12].

Під час тверднення можливі три ситуації розподілу двох компонентів — реперної речовини «А» та домішки «В» — у рідині: повне змішування, часткове змішування та відсутність змішування. В останніх двох випадках необхідно розглядати нерівноважні ефекти, до яких відносяться дифузія, конвекція та нерівномірне просування границі розділу двох фаз через утворення певних кристалічних структур. Ефекти конвекції є невеликими через невеликі градієнти температури в об'ємі зразка, тоді як ефекти дифузії можуть істотно впливати на вид та температурний діапазон кривої тверднення. Ураховуючи типовий порядок коефіцієнтів дифузії D у рідких металах (10^{-5} см²/с), випадок повного змішування апроксимується лише за дуже низьких швидкостях тверднення, тобто за дуже малої швидкості v просування границі розділу двох фаз: $vl/D \ll 1$, де l — довжина зразка у напрямку тверднення, тобто напрямку зростання твердої фази. За умови повного змішування залежність $T_{obs} = f(F)$ визначається рівнянням, заснованим на моделі Гуллівера-Шейла [6]:

$$T_{pure} - T_{obs} = - \sum_i m_l^i c_l^i(F) = - \sum_i m_l^i c_{l1}^i F^{k_0^i - 1}. \quad (20)$$

Коли $k_0^i = 1$, T_{obs} не залежить від F . Із виразу (20) можна отримати рівняння (19), якщо $k_0^i = 0$ та $m_l^i = 1/A$ для всіх домішок.

За умови часткового змішування, розподіл домішок у рідині залежить від дифузії та конвекції та, як наслідок, залежить від умов тверднення й визначається ефективним коефіцієнтом розподілу k_{eff}^i , $k_0^i < k_{eff}^i < 1$. Для границі розділу між твердою та рідкою фазами у безкінечній рідині вираз для ефективного коефіцієнта розподілу має вид [6]:

$$k_{\text{eff}}^i = \frac{k_0^i}{k_0^i + (1 - k_0^i) \exp(-vd / D^i)}, \quad (21)$$

де v — швидкість просування границі розподілу двох фаз; d — частка, яка складає $1/e$ від товщини шару рідини перед поверхнею розділу, в якому відбуваються процеси дифузії; D^i — коефіцієнт дифузії для домішки у рідині. Значення k_{eff}^i наближається до 1, якщо швидкість тверднення i , відповідно, швидкість просування границі розділу «тверда речовина-рідина» є високою. Коли тверднення відбувається дуже швидко порівняно зі швидкістю дифузії, не спостерігається сегрегації домішок, й увесь зразок твердіє за однієї температури.

У випадку відсутності змішування у рідкій фазі для реперного матеріалу, що має кінцевий розмір, під час тверднення результуючий розподіл домішки у твердій фазі суттєво залежить від рівноважного коефіцієнта розподілу домішки, швидкості тверднення, коефіцієнта дифузії домішки у рідині, геометрії зразка та описується рівнянням [6]:

$$c_s^i = c_l^i \left[1 - (1 - k_0^i) \exp\left(\frac{-k_0^i vx}{D^i}\right) \right], \quad (22)$$

де x — відстань від границі «тверда речовина-рідина» до координати, де почалося тверднення.

З урахуванням викладених вище положень щодо залежності в кінцевому рахунку величини $(T_{\text{pure}} - T_{\text{obs}})$ (рівняння (16), (19), (20)) від концентрації та розподілу домішок пропонуються такі методи оцінки складової невизначеності, зумовленої наявністю домішок під час реалізації плато тверднення реперного металу, як: метод за сумою індивідуальних внесків кожної домішки («SIE — Sum of Individual Estimates»); метод, заснований на загальній кількості домішок («OME — Overall Maximum Estimate»), та метод, що базується на репрезентативних порівняннях (метод «ERC — Estimate based on Representative Comparisons»). Окрім того, за визначених обставин, пропонуються комбінований метод «SIE/OME» та додаткові методи перевірки узгодженості даних, отриманих за методами SIE та OME.

МЕТОД SIE ОЦІНКИ СКЛАДОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ, ЗУМОВЛЕНОЇ НАЯВНІСТЮ ДОМІШОК У РЕПЕРНОМУ МЕТАЛІ

Застосування методу SIE вимагає визначення концентрацій усіх домішок у реперному матеріалі зі застосуванням відповідних методів аналізу, до яких відносяться, наприклад, атомно-абсорбційна спектрометрія (AAS), метод термічної екстракції газом-носієм (CGHE), електротермічна атомно-абсорбційна спектрометрія (ETAAS), мас-спектрометрія із тліючим

розрядом (GD-MS), мас-спектрометрія з індуктивно пов'язаною плазмою (ICP-MS), інструментальний нейтронно-активаційний аналіз (INAA) і фотонно-активаційний аналіз (PAA). Окрім того, для застосування методу необхідне знання похідної залежності температури лінії ліквідусу від концентрації домішки (рівняння (2) та (15)), яку має бути виведено для кожної домішки із відповідної рівноважної фазової діаграми за низької концентрації. На базі рівняння (20) підхід SIE дає змінення температури, що спостерігається під час тверднення розчину, відносно температури хімічно чистого реперного матеріалу:

$$\Delta T_{\text{SIE}} = T_{\text{pure}} - T_{\text{obs}} = - \sum_i c_l^i \left(\partial T_i / \partial c_i^i \right) = - \sum_i c_l^i m_i^i. \quad (23)$$

Рівняння (23) дається для $T_{\text{obs}} \equiv T_{\text{liq}}$, де T_{liq} — температура точки ліквідусу, тобто температура реперного зразка за стану, коли $F = 1$ (рівняння (20)), тобто за стану, коли затверділою є безкінечно мала частина реперного зразка. Підсумовування проводиться по всіх домішках, оскільки за низької концентрації домішок є підстави припускати, що кожна домішка впливатиме на температуру тверднення незалежно. Дані щодо рівноважних коефіцієнтів розподілу k_0^i та нахилів ліній ліквідусу для домішок у реперних матеріалах зібрано у [13]. Джерелами даних, наведених у [13], були дані із літератури з так званих «допінгових» досліджень, розрахунки зі застосуванням програмного забезпечення для термодинамічного моделювання або такі, що отримувалися із нахилу ліній ліквідусу, застосовуючи рівняння (15). Якщо необхідна інформація щодо вказаних параметрів є недоступною для усіх домішок [14], метод SIE можна комбінувати з іншими підходами, які буде розглядатимуться нижче. На основі рівняння (23) можна ввести поправку до температури тверднення реалізованої реперної точки. При цьому вираз для стандартної невизначеності оцінки ΔT_{SIE} має вид:

$$u(\Delta T_{\text{SIE}}) = \sqrt{\left[u(c_l^i) m_i^i \right]^2 + \left[c_l^i u(m_i^i) \right]^2}. \quad (24)$$

На практиці реалізація методу SIE ускладнюється внаслідок таких причин, як: обмеження можливостей хімічного аналізу (джерело невизначеності $u(c_l^i)$); обмеженість знання крутизни ліній ліквідусу низько концентрованих розчинів (джерело невизначеності $u(m_i^i)$); вірогідність забруднення реперної речовини під час заповнення нею графітового тигля; недооцінювання впливу оксидів, які утворюються у реперному зразку [15] тощо. Варто зазначити, що невизначеність, зумовлена хімічним аналізом домішок, може бути великою порівняно з іншими невизначеностями. Як зазначається в [10], величина $u(c_l^i)$ може бути на рівні власне величини c_l^i або навіть перевищувати її. У поправці, розрахованій на основі (23),

необхідно приймати до уваги лише домішки, які розчиняються у реперному матеріалі. Як стверджується у [16, 17], деякі домішки можуть бути присутніми у виді нерозчинених оксидів і мають бути виключені із поправки. Такий хімічний аналіз, як мас-спектрометрія із тліючим розрядом, не здатен довести присутність вказаних сполук. Зважаючи на це, для контролю стану реперної речовини у тиглі в процесі експлуатації рекомендується застосовувати додаткові методи досліджень, засновані, наприклад, на аналізі кривої тверднення [6]. Метод *SIE* не рекомендується застосовувати для реперних речовин із чистотою, меншою ніж 99,999 %, оскільки у цьому випадку припущення щодо незалежного впливу домішок не можуть бути застосовані [10].

МЕТОД *OME* ОЦІНКИ СКЛАДОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ, ЗУМОВЛЕНОЇ НАЯВНІСТЮ ДОМІШОК У РЕПЕРНОМУ МЕТАЛІ

Наступний метод — метод *OME* треба застосовувати, якщо інформації щодо концентрації домішок або їх індивідуального впливу на температуру реперної точки недостатньо, щоби застосовувати метод *SIE*. За використання методу *OME* вимагається точна оцінка загальної концентрації домішок, виражена у мольній частці. При цьому змінення температури точки ліквідус дається як (див. рівняння (16)—(19)):

$$\Delta T_{OME} = c_{11} / A. \quad (25)$$

Значення першої кріоскопічної сталої A у сукупності зі схованою теплотою плавлення L для реперних металів: срібла, золота та міді, — наведено у таблиці 1 [18].

Значення ΔT_{OME} не може застосовуватися як поправка до температури тверднення реперної речовини, оскільки рівняння (25) дає максимальну границю для очікуваного змінення температури ΔT_{OME} . Отже величину ΔT_{OME} може бути використано для оцінки складової невизначеності, зумовленої наявністю домішок у реперній речовині. За припущення, що будь-яка температура точки ліквідуса од-

наково ймовірна в границях від $-\Delta T_{OME}$ до ΔT_{OME} , маємо вираз для складової невизначеності [6]:

$$u(\Delta T_{OME}) = \frac{\Delta T_{OME}}{\sqrt{3}} = \frac{c_{11}}{A\sqrt{3}}. \quad (26)$$

Якщо невизначеності результатів хімічного аналізу домішок та нахили m_i^i (формула (23)) достатньо малі, метод *SIE* дає, як правило, менші оцінки невизначеності, ніж метод *OME*. Хімічний аналіз має включати, як мінімум, усі елементи, які зазвичай зустрічаються у конкретному реперному матеріалі та які наведено у [14]. Як підкреслюється у [6], сертифікат хімічного аналізу реперної речовини має містити інформацію щодо невизначеності під час аналізу. Якщо інформація від постачальника є недостатньою, наприклад, відсутні оцінки невизначеностей, не вказано границі виявлення під час аналізу або перелік виявлених елементів є неповним відповідно до [14], рекомендується керуватися значенням номінальної чистоти конкретного зразка (наприклад, 99,9999 %) з оціненою стандартною невизначеністю, яка дорівнює значенню домішок, що залишилися, тобто 10^{-6} мольної частки. Зонна очистка, яку застосовують під час виробництва високочистих металів, переважно видаляє домішки з $k_0^i > 2$. У такому випадку метод *OME* дає максимальну оцінку через надійність визначення для таких реперних металів загальної кількості домішок c_{11} .

Варто зазначити, що певний період часу перевага віддавалася саме методу *OME*. Так, у роботі [19] метод *OME* визнано пріоритетним за умови, якщо в процесі експлуатації виконується контроль та перевірка ампул з реперними речовинами за допомогою додаткових методів аналізу кривої тверднення та прямого звірення ампул. У таблиці 2 наведено приклад розрахунку за методом *OME* для зразка індію з одного лота чистотою 99,99999 %, яким було заповнено три еталонні ампули у *NIST* [19]. Реперний метал, який було отримано у *NIST*, пройшов аналіз мас-спектрометрії із тліючим розрядом, а в сертифікаті аналізу було наведено відповідні елементи, виявлені під час аналізу, з їх вмістом за масовою часткою. У третьому стовпці таблиці 2 наведено відносну атомну масу, що є значенням маси, виражене в атомних одиницях маси.

Відносна атомна маса визначається як відношення маси атома певного елемента до 1/12 маси нейтрального атома ізотопу вуглецю ^{12}C . Значення у четвертому стовпці отримано діленням масової частки домішки, наведеної у другому стовпці, на відносну атомну вагу. Оскільки кількість речовини, виражена у молях, прямо пропорційна кількості атомів, числові значення у п'ятому стовпці отримано діленням кількості атомів певної атомної ваги на загальну кількість атомів, яку містить одна одиниця

Таблиця 1. Значення кріоскопічних сталих та схованої теплоти плавлення [18]

Table 1. Values of cryoscopic constants and latent heat of fusion [18]

Речовина	T , К	L , Дж/моль	A , К ⁻¹	A^{-1} , мК/10 ⁻⁶ мольної частки
Ag	1234,93	11284	0,000890	1,124
Au	1337,33	12720	0,000855	1,170
Cu	1357,77	12928	0,000843	1,186

Таблиця 2. Результат розрахунку ΔT_{OME} [19]Table 2. Calculation result ΔT_{OME} [19]

Аналіз мас-спектрометрії з тліючим розрядом Arconium 79 In (лот S2739)				
NIST: ампули In 96-4, In 96-5, In 96-6				
Елемент	Домішки, мас. %	Відносна атомна вага	Кількість атомів даної атомної ваги	Молярна частка, %
Sn	$5 \cdot 10^{-8}$	118,7	$4 \cdot 10^{-10}$	$4,84 \cdot 10^{-8}$
Pb	$2 \cdot 10^{-8}$	207,2	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$
Fe	$5 \cdot 10^{-9}$	55,85	$9 \cdot 10^{-11}$	$1,03 \cdot 10^{-8}$
Ni	$4 \cdot 10^{-9}$	58,69	$7 \cdot 10^{-11}$	$7,82 \cdot 10^{-9}$
Al	$4 \cdot 10^{-9}$	26,98	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,70 \cdot 10^{-8}$
Na	$1 \cdot 10^{-8}$	22,99	$4 \cdot 10^{-10}$	$4,99 \cdot 10^{-8}$
Si	$7 \cdot 10^{-9}$	28,09	$2 \cdot 10^{-10}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
In	0,9999999	114,8	$9 \cdot 10^{-3}$	
	1,000000000		$8,7108020 \cdot 10^{-3}$	
Молярна частка сумарної концентрації домішок				$1,73 \cdot 10^{-7}$
Перша кріоскопічна стала для In				0,00213
Оцінка складової невизначеності внаслідок домішок (стандартна невизначеність $u(\Delta T_{OME})$), мК				0,08

маси реперного металу. Як видно із таблиці 2, за складову невизначеності приймається власне величина ΔT_{OME} , тобто не розглядається прямокутний розподіл та, як наслідок, отримане значення ΔT_{OME} не ділиться на корінь квадратний із трьох. Оцінка стандартної невизначеності у таблиці 2 розглядається із симетричними границями, хоча ефект впливу домішок найімовірніше має «асиметричний» характер.

МЕТОД КРИВОЇ ТВЕРДНЕННЯ ЯК ДОДАТКОВИЙ МЕТОД ПЕРЕВІРКИ УЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ, ОТРИМАНИХ ЗА МЕТОДАМИ SIE ТА OME

Додатковий метод контролю стану реперної речовини в процесі експлуатації ампули з реперним металом полягає в аналізі кривої тверднення реперної речовини. У [19] цей метод застосовують для перевірки узгодженості даних, отриманих за методом OME до початку експлуатації ампули (тигля) з реперним металом. Ця перевірка дозволяє визначити, чи не було внесено додаткових домішок до реперної речовини під час виготовлення ампули та заповнення її реперною речовиною. На рисунку 1 наведено криву тверднення для реперної точки In 96-4 залежно від затверділої частки реперного металу F_x [19]. За F_0 обирається точка у часовий момент рекалесценції зразка, а значення F_1 — коли температура, що спостерігається, на 10 мК нижче пікового значення температури на кривій тверднення. На шкалі ординат відкладено різниці між вимірюваною температурою та піковою температурою на плато тверднення.

Лінійна регресія виконується від $F_{0,2}$ до $F_{0,7}$ для визначення нахилу кривої тверднення. Температурна

різниця $\Delta T(F_{0,5} - F_0)$, у сукупності з першою кріоскопічною сталою, дає можливість оцінити концентрацію домішок у мольній частці в певному зразку реперної речовини. У таблиці 3 для порівняння наведено результати для оцінки складової невизначеності, пов'язаної з домішками, для реперного металу з однієї партії (лота) для двох методів визначення впливу домішок — OME та методу кривої тверднення.

Як видно, оцінка концентрації домішок за аналізом кривої тверднення дає результат, що є у три рази меншим від результату, отриманого за методом OME. У цьому випадку для оцінки складової невизначеності, пов'язаної з впливом домішок, використовують результати за методом OME. Менші значення, отримані за методом кривої тверднення, можуть означати, що під час хімічного аналізу постачальник перео-

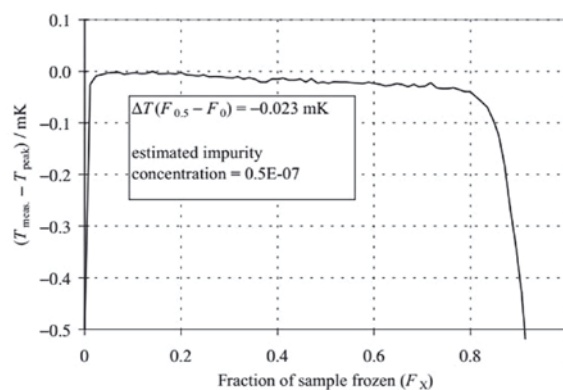


Рис. 1. Вид кривої тверднення реперної точки у додатковому методі аналізу впливу домішок [19]
Fig. 1. View of the solidification curve of the fixed point in an additional method for analyzing the effect of impurities [19]

Таблиця 3. Результати порівняння методу OME з методом кривої тверднення [19]

Table 3. Results of comparison of the OME method with the solidification curve method [19]

NIST: ампула In 96-4 (лот S2739)		
Метод	Оцінка концентрації домішок	Оцінка складової невизначеності через наявність домішок, мК
OME	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,08
Крива тверднення	$0,5 \cdot 10^{-7}$	0,02
Загальна концентрація домішок за масовою часткою	$0,1 \cdot 10^{-7}$	0,05

цінив кількість домішок або рівноважні коефіцієнти розподілу (формула (1)) однієї або декількох домішок наближаються до одиниці. Домішки з коефіцієнтом розподілу $k_0^i = 1$ не впливають на нахил кривої тверднення, але впливають на температуру тверднення реперного металу. Більші значення за методом кривої тверднення можуть свідчити, що зразок із реперним металом було забруднено під час заповнення тигля реперним матеріалом або під час хімічного аналізу було недооцінено кількості домішок. Коли метод кривої тверднення дає більше значення ніж метод OME, для оцінки невизначеності використовується величина $\Delta(F_{0,5} - F_0)$ [19]. Необхідно зазначити, що для достовірної форми кривої тверднення необхідно мінімізувати вплив теплового оточення (режимів печі) тигля з реперним металом на вказану криву. В останньому рядку таблиці 3 наведено результати розрахунків за методом визначення загальної концентрації домішок за масовою часткою («Total impurity concentration method») замість мольної частки. Як зазначається в [19], цей метод може застосовуватися за грубих оцінок у промисловості та є неприйнятним для застосування у НМІ, оскільки в ньому не розраховуються внески концентрацій домішок залежно від атомної ваги, що призводить до заниження складової невизначеності.

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД SIE/OME

У [6] також пропонується комбінувати методи SIE та OME. Зокрема, застосовувати метод SIE для домінуючих домішок (та відповідно вводити поправку до температури тверднення) та метод OME для решти домішок. Важливо зазначити, що закон Рауля (рівняння (19), (25)) є справедливим лише для домішок, які не розчиняються у твердій фазі ($k_0^i = 0$). Отже, результати хімічного аналізу також необхід-

ні для того, щоби вплив домішок зі значною розчинністю у твердій фазі, в першу чергу, враховувався за методом SIE. За $k_0^i > 0,1$ застосування закону Рауля буде істотно недооцінювати змінення температури точки ліквідус. Окрім того, у вказаній комбінації методів можна модифікувати метод OME, за яким оцінка загальної концентрації домішок виконується для домішок із рівноважними коефіцієнтами розподілу $k_0^i \leq 0,1$. Змінення температури ліквідус внаслідок впливу цих домішок може бути оцінено шляхом підгонки правої частини рівняння (19) до кривої тверднення у відповідному діапазоні F [6]. Отже, необхідно лише визначити концентрації домішок із $k_0^i > 0,1$ та поєднати дві оцінки невизначеності, які базуються на рівняннях (24) ($k_0^i > 0,1$) та (26) ($k_0^i \leq 0,1$). Можна очікувати, що форма кривих тверднення або плавлення залежатиме як від теплових впливів печі, так і від характеру власне процесу фазового перетворення. Якщо розглянути типовий процес тверднення, в якому домішка менш розчинна у твердій фазі ніж у рідині, зростання твердої речовини на границі розділу «тверда речовина-рідина» призводить до відхилення домішки від твердої речовини, створюючи шар рідини, багатий на домішки, на границі розділу. За умов рівноважного тверднення концентрація домішок у рідині має достатній час для гомогенізації за допомогою дифузних та конвекційних процесів. Оскільки такі умови рівноваги рідко досягаються, коефіцієнт розподілу не досягає свого рівноважного значення, але приймає «ефективне» значення k_{eff}^i (рівняння (21)) між k_0^i та одиницею. Якщо умова $k_{eff}^i \leq 0,1$ не виконується, застосування рівняння (19) є некоректним. Як вказується у [6], є доцільними дослідження залежності кривої тверднення від швидкості процесу тверднення. Такі дослідження дозволяють оцінити відхилення процесу тверднення від поведінки, що відповідає (19). Відомо, що форма кривої плавлення є чутливою до розподілу домішок. Це може бути продемонстровано шляхом порівняння плавлення після дуже швидкого тверднення, що зазвичай призводить до достатньо однорідного зразка реперної речовини, із плавленням після дуже повільного тверднення, що зумовлює значну сегрегацію домішок.

МЕТОД ERC, ЯК МЕТОД ПЕРЕВІРКИ

УЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ, ОТРИМАНИХ

ЗА МЕТОДАМИ SIE, OME АБО ЇХ КОМБІНАЦІЄЮ

Ще одним із методів оцінки складової невизначеності, зумовленої наявністю домішок, є метод ERC, заснований на прямих звіреннях виготовлених

тиглів (ампул) з реперними металом із так званим «еталонним» тиглем з тим же реперним металом. Цей метод, як й метод кривої тверднення, є додатковим методом, який застосовується для перехресної перевірки результатів, отриманих після виконаних розрахунків за методами *SIE*, *OME* або їх комбінацією. У [19] цей метод застосовували для еталона одиниці температури у сфері контактної термометрії. Виготовляли як мінімум три нових тигля із реперною точкою, при цьому реперний метал у цих тиглях був із однієї партії (лота), що пройшов хімічний аналіз. Ці три тигля звірювалися з наявною еталонною ампулою з реперною точкою для визначення різниці між температурами реалізації плато тверднення нового та еталонного тиглів. Пряме звірення проводилося шляхом одночасних реалізацій фазових переходів для еталонного та нового тиглів у двох окремих, але майже однакових печах. При цьому виконувалися три набори послідовних вимірювань за однакових моментів часу на їх плато. Для кожного нового тигля (ампули) проводилося по три звірення з еталонною ампулою. На рисунку 2 наведено результати таких порівнянь для тиглів In 94-4 та In 96-3 *NIST*, де за шкалою ординат наведено різниці температур для відповідних тиглів, які було розраховано відносно до результатів, отриманих під час прямого звірення конкретного тигля з еталонним тиглем із реперною точкою. Якщо метод аналізу кривої тверднення свідчить, що під час виготовлення тигля з реперною точкою не відбулося забруднення реперного металу домішками, то варто очікувати, що за методом *ERC* буде отримано узгоджені різниці температур порівняно з еталонним тиглем. Окрім того, у випадку, коли нову ампулу та еталонну ампулу заповнено реперною речовиною із різних партій (лотів) (тобто вони мають різні результати хімічного аналізу), названі різниці температур мають узгоджуватися з відповідними концентраціями домішок для обох ампул, які розраховано за сумою мольних часток домішок.

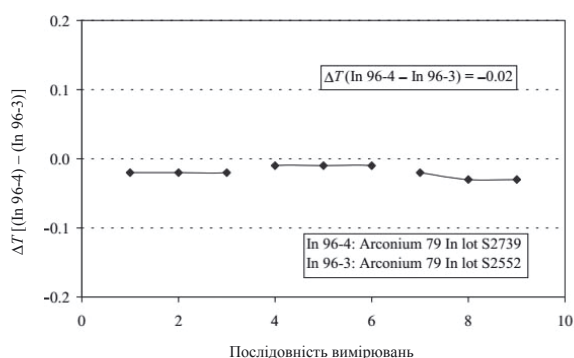


Рис. 2. Результати, отримані за методом *ERC* [19]
Fig. 2. Results obtained by the *ERC* method

ВИСНОВКИ

Оскільки реальні речовини, які застосовують для відтворення температур реперних точок МТШ-90, не є абсолютно чистими, наявність домішок є джерелом складової бюджету невизначеності реалізації температур відповідних фазових переходів. Під час розроблення або модернізації еталонів одиниці температури важливою є інформація, яка наводиться в документах постачальника щодо типу, кількості та концентрації домішок у реперній речовині за масовою часткою.

Проведений розгляд та аналіз тенденцій розвитку методів оцінки впливу домішок на температуру, зокрема, реперних точок тверднення чистих металів свідчить, що застосування методу *SIE* є доцільним за умови визначення концентрацій усіх домішок у реперному матеріалі зі застосуванням відповідних методів хімічного аналізу. Як зазначається у [6, 10], в сертифікатах хімічного аналізу рекомендується наводити інформацію щодо невизначеності оцінки кількості та концентрації домішок. Окрім того, застосування методу *SIE* вимагає знання похідної залежності температури лінії ліквідусу від концентрації кожної домішки. За методом *SIE* можна розраховувати величину змінення температури ΔT_{SIE} (формула (23)), що спостерігається під час тверднення розчину, залежно від наявності домішок та за припущення, що кожна домішка впливатиме на температуру тверднення незалежно. Вказане припущення не є прийнятним для реперних речовин із чистотою, меншою ніж 99,999 %. Величина ΔT_{SIE} відтак розглядається як поправка до температури реперної точки. Невизначеність величини ΔT_{SIE} (формула (24)) зумовлюється можливостями хімічного аналізу та неточністю знання крутизни ліній ліквідусу низькоконцентрованих розчинів.

Метод *OME* треба застосовувати, якщо інформації щодо концентрації домішок або їх індивідуального впливу на температуру реперної точки недостатньо, щоби застосовувати метод *SIE*. Для методу *OME* вимагається точна оцінка загальної концентрації домішок, виражена у мольній частці. Величина змінення температури ΔT_{OME} (формула 25), на відміну від ΔT_{SIE} , не може розглядатися як поправка до температури тверднення реперної речовини і входить до розрахунку складової невизначеності (формула (26)), зумовленої наявністю домішок. Отже, метод *OME*, зазвичай, дає більші оцінки невизначеності, ніж метод *SIE*.

Також можлива комбінація вказаних вище методів *SIE/OME*, за якої метод *SIE* застосовують для домінуючих домішок з розрахунком поправки до температури тверднення аналогічно формулі (23), а метод *OME* застосовують відповідно для решти домішок.

Додатковими методами перевірки узгодженості даних, отриманих за методами *SIE*, *OME* або їх комбінацією, є метод кривої тверднення та метод *ERC*. Перший із вказаних методів доцільно застосовувати після заповнення реперною речовиною графітової ампули або тигля. За цим методом проводять аналіз кривої тверднення реперної речовини [19]. Така перевірка дозволяє визначити, чи не було внесено додаткових домішок під час заповнення тигля реперним металом. Метод *ERC*, який застосовують під час експлуатації графітової ампули або тигля, полягає у прямих звіреннях декількох виготовлених ампул (тиглів), заповнених реперним металом, із відповідним еталонним тиглем. Якщо метод

аналізу кривої тверднення свідчить, що під час виготовлення тигля із реперною точкою не відбулося забруднення реперного металу домішками, то варто очікувати, що за методом *ERC* буде отримано узгоджені різниці температур порівняно з еталонним тиглем.

Метод визначення загальної концентрації домішок за масовою часткою («*Total impurity concentration method*») може застосовуватися лише за грубих оцінок у промисловості та є неприйнятним для застосування у НМІ, оскільки в ньому не розраховуються внески концентрацій домішок залежно від атомної ваги, що призводить до заниження величини відповідної невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Guide to the Realization of the ITS-90. Metal Fixed Points for Contact Thermometry. — Document BIPM, 2018. — 34 p. Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_4_MetalFixedPoints_2018.pdf
2. Guide to the Realization of the ITS-90. Radiation Thermometry. — Document BIPM, 2018. — 17 p. Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_6_RadiationThermometry_2018.pdf
3. Guide to the Realization of the ITS-90. Fixed Points for Radiation Thermometry. — Document BIPM, 2018. — 8 p. Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_5_RTFixedPoints_2018.pdf
4. Fellmuth B., Fischer J., Tegeler E. Uncertainty budgets for characteristics of SPRTs calibrated according to the ITS-90 / B. Fellmuth // Document CCT/01-02: Доступ до електронного ресурсу: <https://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/21/CCT01-02.pdf>
5. Uncertainty budgets for realization of scales by radiation thermometry. — Document CCT/03-03: Доступ до електронного ресурсу: <https://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/22/CCT03-03.pdf>
6. Guide to the Realization of the ITS-90 Fixed Points: Influence of Impurities. — Document BIPM: Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_2018.pdf
7. Доступ до електронного ресурсу: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=103>
8. Доступ до електронного ресурсу: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison/quick-search?keywords=CCT-K4&displayResults=true>
9. Supplementary information for the international temperature scale of 1990. Document BIPM, 1990. — 177 p.
10. Methodologies for the estimation of uncertainties and the correction of fixed-point attributable to the influence of chemical impurities. — Document CCT/05-08: Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/23/CCT_05_08_rev.pdf
11. Guide to the Realization of the ITS-90 Fixed Points: Influence of Impurities. Appendix 1: Derivation of an approximate relation between the equilibrium distribution coefficient and thermodynamic quantities. Document BIPM: Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_Appendix-1_2018.pdf
12. Fellmuth B. Comments on the underestimation of the change of fixed-point temperatures by impurities due to a non-justified application of Raoult's law / B. Fellmuth // Document CCT/03-12: Доступ до електронного ресурсу: <http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/22/CCT03-12.pdf>
13. Guide to the Realization of the ITS-90 Fixed Points: Influence of Impurities. Appendix 2: Distribution coefficients and liquidus-line slopes. Document BIPM: Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_Appendix-2_2018.pdf
14. Guide to the Realization of the ITS-90 Fixed Points: Influence of Impurities. Appendix 4: Recommended List of Common Impurities for Metallic Fixed-point Materials of the ITS-90. Document BIPM: Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_Appendix-4_2018.pdf
15. Guide to the Realization of the ITS-90 Fixed Points: Influence of Impurities. Appendix 3: Data on precipitation. Document BIPM: Доступ до електронного ресурсу: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_Appendix-3_2018.pdf
16. Fahr M., Rudtsch S. Oxides in metal fixed points of the ITS90 / M. Fahr // Metrologia. — 2009. — V. 46. — P. 423—438.
17. Fahr M., Rudtsch S., Aulich A. Further findings of impurity precipitation in metal fixed points / M. Fahr // Int. J. Thermophys. — 2011. — V. 32. — P. 2239—2251.
18. Rudtsch S. Cryoscopic Constant, Heat and Enthalpy of Fusion of Metals and Water / S. Rudtsch // Document CCT/05-04/rev: Доступ до електронного ресурсу: http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/23/CCT_05_04_rev.pdf
19. Strouse G. F. NIST Methods of Estimating the Impurity Uncertainty Component for ITS-90 Fixed-Point Cells from the Ar TP to the Ag FP // G. F. Strouse / Document CCT/03-19: Доступ до електронного ресурсу: <http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/22/CCT03-19.pdf>

Отримано / received: 18.01.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. О.Д. Купком, Національний науковий центр «Інститут метрології», Україна.
D. Sc. (Techn.) O.D. Kupko, Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.14-18

УДК 620.3

SYSTEM FOR RECOGNITION OF OPTICAL TOOLS, BASED ON FRACTAL MATHEMATIC VIEWS

Система для виявлення оптичних приладів, заснована на уявленнях фрактальної математики

Yu. S. Kurskoy, doctor of physical and mathematics sciences,
e-mail: kurskoy@rambler.ru

O. S. Hnatenko, candidate of physical and mathematics sciences,
Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine,
e-mail: oleksandr.hnatenko@nure.ua

Ю. С. Курський, доктор фізико-математичних наук,
e-mail: kurskoy@rambler.ru

О. С. Гнатенко, кандидат фізико-математичних наук,
Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна,
e-mail: oleksandr.hnatenko@nure.ua

The aim of the paper is development of laser optoelectronic system for recognition of optical tools. The main algorithm of the system is based on fractal insights about the structure of the optical signal and determination of the fractal dimension intensity distribution in a cross-sectional plane of the laser pulse reflected from the optical target. The authors analyze the application of topological methods and tools for researching of complex physical processes, in particular the process of optical signals propagation in an inhomogeneous atmosphere. It is proved that the Lyapunov indexes, Kolmogorov-Sinai and Shannon entropies, as well as the fractal dimension can be used to successful study of the complex optical signals. The authors propose an approach for identification of optical objects that based on fractal analysis of the signals reflected from objects' surfaces. It is proved that the approximation of fractal dimension value of the signal to 1 is a condition for identification of optical devices. Because of the atmospheric scattering of laser pulses and noise exposure, this value may be in the range between 1.1 and 1.3. To classify the type of optical device (binoculars, video camera, etc.) along with the fractal dimension, a group of other fractal characteristics (the type of fractal signatures, the type of spatial spectrum and spatial frequency values), that characterize the signal structure, should be used also. The developed fractal model is proposed to use in the infrared system for searching of hidden optical surveillance devices. The authors propose the principles of operation, common structure and calculation results for optical part of the system. It is proved that the use of the fractal model in the algorithm of information processing will allow the system as to search and determine coordinates of target so to classify objects and determine erroneous targets too.

Метою статті є створення лазерної оптико-електронної системи виявлення та розпізна-

вання оптичних систем. Головний алгоритм системи базується на фрактальних уявленнях щодо структури оптичного сигналу та визначенні фрактальної розмірності розподілу інтенсивності лазерного імпульсу, відбитого від об'єкта розпізнавання, в площині його поперечного розрізу. Авторами виконано аналіз застосування методів та інструментів топології для дослідження складних фізичних процесів, зокрема, процесу розповсюдження оптичних сигналів у неоднорідній атмосфері. Доведено, що показники Ляпунова, ентропії Колмогорова-Сіная та Шеннона, а також фрактальна розмірність можуть бути застосовані для дослідження оптичних сигналів. Запропоновано підхід до ідентифікації оптичних об'єктів, заснований на фрактальному аналізі відбитих від них сигналів. Доведено, що наближення значення фрактальної розмірності сигналу до одиниці є умовою для ідентифікації оптичних пристроїв. Унаслідок атмосферного розсіювання та впливу шумів ця величина може міститися в інтервалі між 1.1 та 1.3. Для класифікації типу оптичного пристрою (бінокля, відеокамери або ін.), разом із фрактальною розмірністю, повинна бути застосована також група фрактальних характеристик, що складається з типу фрактальних сигнатур, типу просторового спектра та значень просторової частоти, які характеризують структуру сигналу. Розроблену фрактальну модель запропоновано для використання в інфрачервоній області спектра випромінювання системи пошуку прихованих оптичних пристроїв спостереження. Авторами наведено принципи роботи, структуру та виконано розрахунки оптичної частини системи. Доведено, що використання розробленої фрактальної моделі в алгоритмі опрацювання інформації системи дозволить їй не лише здійснювати пошук та визначати координати, а й класифікувати об'єкти та визначати помилкові цілі.



Yu. S. Kurskoy



O. S. Hnatenko

Keywords: optical system, optical signal, interference, fractal dimension, laser.

Ключові слова: оптична система, оптичний сигнал, інтерференція, фрактальна розмірність, лазер.

INTRODUCTION

A wide range of cybersecurity tasks that maintain commercially sensitive information covers the tasks of protection against unauthorized video and photo recording. Its implementation is performed by laser optoelectronic systems (LOS), allowing to locate the hidden optical devices (OD), such as binoculars, video and photo cameras.

The principle of LOS operation is based on the process of scanning the space by a laser beam and the task of determining the location of the reflective surface, which is the objective lens. More sophisticated LOS allows not only to determine the coordinates of the hidden optical surveillance devices, but also to recognize and classify them. If the physics of OD coordinates determination is described in detail in the literature that deals with optical location [1—2], then the issue of recognition and classification is a business secret of the manufacturer.

The classification of OD is related to object recognition tasks. The object recognition includes three stages: obtaining information on the object; selection and evaluation of natural and artificial features (the simplest characteristics or properties); recognition and classification of an object on the basis of the analysis of the selected features. The most popular methods are: Fourier analysis and correlation analysis, contour analysis, fractal analysis, wavelet analysis, search method and others [3].

The mentioned fractal analysis relates to topological methods used to analyze time-series processes and images, including the objects classification during radiolocation [4]. The aim of the paper is development of the laser optoelectronic system for recognition of optical tools, based on fractal mathematic view.

THEORETICAL STUDIES OF THE LOS MAIN PARTS

Let's consider an optical system that perceives radiation from a surface lighted by a laser, the principal scheme of which is shown in Fig. 1.

The laser with the 2ω difference angle lights a surface that is at a distance p from the optical system. We can assume that the solid angle Ω is equal to [5]:

$$\Omega = \pi \cdot \omega^2. \quad (1)$$

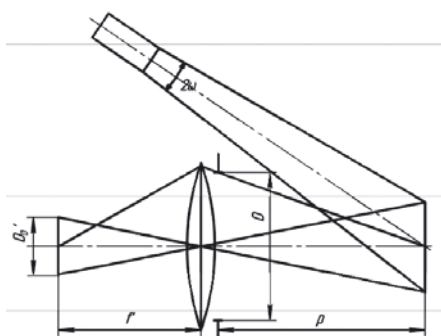


Fig. 1. The course of radiation rays reflected from the object surface

The emission in the Ω bodily angle is uniform. Then the emission intensity in the direction of the laser axis is equal to:

$$I_e = \Phi_e / \pi \cdot \omega^2, \quad (2)$$

where Φ_e is the laser radiation flux.

With normal falling of rays on the lighted surface, E_e light intensity is equal to:

$$E_e = \tau_a \cdot I_e / p^2, \quad (3)$$

where τ_a is the atmosphere transmittance.

Assuming that the lighted surface is a Lambert surface with ρ reflection coefficient, we find the surface radiance:

$$L_t = \rho \cdot E_e / \pi. \quad (4)$$

The diameter of the surface lighted with laser is:

$$D_0 = 2\omega p. \quad (5)$$

An increase in the optical system at considerable p distance can be assumed to be equal to:

$$B = f' / p. \quad (6)$$

Image diameter in sensory element:

$$D_0' = D_0 \cdot \beta. \quad (7)$$

Since the laser system should operate at a distance of up to 3000 m (at larger distances it is not necessary), and the focal length of the gluing lens (collimator of the receiving optics) is 150 mm (existing lenses in the market), the diameter of the spot radiation in the focus of the lens is 200 μ m.

If the image fits into the photosensitive surface of the sensory element, then the required relative diameter of the receiving optical system will be as follows:

$$D / f = 2\sqrt{i_{\min} / \tau_a \cdot \tau_{lf} \cdot \tau_{os} \cdot Q_0' \cdot S(\lambda) \cdot L_e}, \quad (8)$$

where τ_a , τ_{lf} , τ_{os} are atmospheric transmittance coefficients, light filters, optical system; Q_0' — object image area; $S(\lambda)$ — absolute spectral sensitivity of the sensory element to monochromatic laser emission.

The area of the photosensitive element is 200 μ m, therefore, based on the research paper [6], the diameter of the recording optical system is 48 mm, and, taking into account all tolerances, the diameter of the AC508-150-A collimator (gluing lens) is 58 mm. The proposed optical model allows you to quickly calculate the parameters of optical elements and systems for the design of laser devices and such as shown Fig. 2.

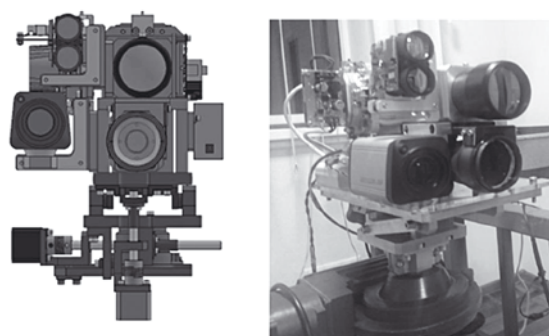


Fig. 2. The general structure and research model of laser optoelectronic systems for recognition of optical tools

THE PRACTICAL APPLICATION OF TOPOLOGY

Topology is the study of modal relations of spatial images, or of laws of connectedness, mutual disposition and traces of points, lines, surfaces, bodies and their parts or their unions in space, independently of relations of measures and quantities. Topology has proved to be an effective research theory of complex processes and objects. Modern topological analysis is considered as a prospective line of development of the research theory for nonlinear dynamic systems. It is a tool for evaluation Nonlinear Metrology [7–8] (NM). The NM task is a measurement of the complex dynamical systems parameters. As the examples of such systems can be the optical signals. Topological photonics is being developed in recent years. It is a new line that studies the issue of the realization of topological effects in photonic crystals, coupled cavities, metamaterials and quasicrystals [9]. Topological methods are used for image evaluation [4].

There are the group of popular topological instruments that have demonstrated the high effective in the study of complex systems and optical signals. In the frame of NM such instruments as Lyapunov exponents, Shannon and Kolmogorov entropy, attractor and fractal dimension are used. These parameters can be used for researching and analysis of the optical signals with the complex structure and changing in time characteristics. Let's consider them.

Lyapunov exponents are used for study the dynamics of a system in the vicinity of an arbitrary trajectory. They characterize the degree of stretching and contraction of the phase portrait along the selected phase trajectories. If the two close trajectories $x_i(t)$ and $x_{i+1}(t)$ are chosen so that $x_{i+1}(t) = x_i(t) + \xi(t)$, $\xi(0) = \varepsilon$, $\varepsilon \rightarrow 0$ that the next function:

$$\Xi[\xi(0)] = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \left[\frac{\xi(t)}{\xi(0)} \right] \quad (9)$$

takes a finite series of the Lyapunov exponents $\{\lambda_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, the totality of which forms the Lyapunov spectrum. The number of Lyapunov exponents corresponds with the attractor dimension D_A , which can be fractional:

$$D_A = j + \sum_{i=1}^j \frac{\lambda_i}{|\lambda_{j+1}|}, \quad (10)$$

Here j is Lyapunov dimension, it is determined from the expressions:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j > 0, \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{j+1} < 0.$$

The total Lyapunov exponent Λ can be considered as an indicator of a stability of a system dynamics. When $\Lambda = 0$ it is Hamiltonian system. It has a stable dynamic, the processes occurring in it can be regarded as deterministic processes, the volume of the phase portrait is unchanged $\Delta V_A = \text{const}$. When $\Lambda > 0$ the phase

portrait volume is growing $\Delta V_A \uparrow$, the dynamics is chaotic. If $\Lambda < 0$ the phase portrait volume decreases $\Delta V_A \downarrow$, that typical for the dissipative systems.

For topological analysis of the systems the Shannon (H -entropy) and the Kolmogorov-Sinay (K -entropy) are used. H -entropy (or information entropy) is one of the key concepts of the information theory. For a system that can be in the states X_i with probability distribution density $p(X_i)$, Shannon entropy is given by the next formula:

$$H = - \sum_{i=1}^N p(X_i) \ln p(X_i). \quad (11)$$

Entropy is a measure of the order or disorder of the system. According to (11), The Shannon entropy assumes large values when the distribution density $p = p(X_i)$ has the values small. If a number of values N is bounded, then the entropy is maximal for the uniform distribution law $H \rightarrow \ln N$ for $p(X_i) \rightarrow 1/N$. The entropy is minimal $H \rightarrow 0$ for the normal distribution law when $p(X_i) \rightarrow 1$. The entropy of a strange attractor is higher than the entropy of a regular attractor. The entropy of chaotic and random dynamics is higher than the entropy of an ordered motion. The change of the H -entropy values indicates a change of dynamic.

The using the Kolmogorov entropy allowed us to introduce a rigorous criterion of chaotic, as an unstable by Lyapunov motion with positive metric entropy $K > 0$. Analyzing the phase portrait of a system, the K -entropy is defined as:

$$K = \lim_{\substack{d(0) \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty}} \frac{\ln[d(t)/d(0)]}{t}, \quad (12)$$

where $d(0)$, $d(t)$ are the distances between two nearby trajectories at the initial and current time, respectively: $d(t) = |x_2(t) - x_1(t)|$.

According to (12) the K -entropy characterizes the degree of the trajectories divergence, and the degree of randomness of the system dynamics. It is related to the Lyapunov exponents (4) by the expression:

$$K = \int \sum_{\lambda_i \geq 0} \lambda_i(x) d\mu. \quad (13)$$

The fractal dimension is a main characteristic of such structure as a fractal. According to B. Mandelbrot, a fractal can be defined as an object for which the Hausdorff-Besicovitch dimension (the fractal dimension D) strictly exceeds the topological dimension [10].

Fractal signs can be found in the structure of signals and fields, behavior of functions that evaluate the distribution of physical quantities in time and space during the physical research. It follows that it would be possible to search for a fractal dimension as a special characteristic of processes or images.

The method of rescaled range that is empirically derived by P. Hurst is used to compute the D series $\{x_i\}$ (where $\{x_i\}$ is the value of a quantity x , $i = 1, \dots, n$) [9–15].

Evaluation of the series $\{x_i\}$ allows us to calculate the Hurst exponent Hr associated with D :

$$D = 2 - Hr. \quad (14)$$

The values of the Hurst exponent vary between $0 \leq H \leq 1$ and are determined by the ratio R/σ , where: R — the span between the maximum and minimum values of the increment function $x(i, n)$, σ — the standard deviation:

$$R(i) = \max_{1 \leq i \leq n} x(i, n) - \min_{1 \leq i \leq n} x(i, n); \quad (15)$$

$$x(i, n) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)$$

where $\bar{x}_i$ — the mean $\{x_i\}$.

The ratio R/σ is related to the parameter Hr as follows:

$$R/\sigma = (n/2)^{Hr} \quad (16)$$

By using (14)–(16) it is possible to obtain the value of the fractal dimension for both the entire observation interval or its selected areas as well as to determine the dynamic characteristic of x for both selected time spans or during the observation time on the whole. To classify the dynamics of x , a fractal scale is created with points 1, 1.5, 2: at $D = 1$ when the dynamics of x is strictly determined; at $D = 2$, when the value of x behaves in a regular manner, but the range of the measured values is very large; at $D = 1.5$ the dynamics of x is random. If $1 < D < 1.5$ or $1.5 < D < 2$, then the process in question is non markovian, random, persistent and antipersistent, respectively.

Knowledge of the fractal dimension of the D series $\{x_i\}$ allows us to evaluate the behavior of the measuring object (or signal structure) and to select the appropriate mathematical tool for processing the measurement results.

TOPOLOGICAL RECOGNITION

OF OPTICAL SURVEILLANCE DEVICES

The topological model of optical surveillance devices (OSD) recognition which is based on fractal insights about the structure of signals can be proposed. Consider LOS which operates under procedure: the laser pulse propagates in the direction of the possible OSD, and then it reflects from the surface of an object and returns back. The aim of LOS is to determine the coordinates of the reflective surface and recognize it. Consider the issue of object recognition, leaving out of scope of this paper the issue of the coordinate determination of an object by means of optical methods. The aim of recognition arises from the need to detect OSD against the background of possible «false» targets with reflective surfaces.

A special feature of OSD is that the refractive and reflective surfaces of optical parts are coated with thin films of various material substances, such as metals and their oxides, dielectrics, silicon, etc. This makes it possible to change the optical characteristics of the parts and give them new physical properties. The lenses of binoculars, photo and video cameras are coated with antireflection coatings, the material and thickness of which are chosen

such as to be able to transmit the visible radiation. The waves for which the condition is fulfilled are practically not reflected:

$$\lambda = 4dn, \quad (17)$$

where d — the film thickness, n — refraction index.

In the case of a multilayer coating, we consider the wavelength range $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$ specified by the condition (17). Radiation with wavelengths that do not fall within this range is reflected. In such case, due to the overlapping of radiation reflected from different layers of the coating, interference in the reflected beams is observed [13–18].

The presence of signal interaction traces with the antireflection coating in the reflected optical signal leads to the possibility of OSD recognition. The study object would be a cross-sectional area of a laser beam reflected from a surface covered with a thin film. Evaluation of the beam's cross-sectional area is performed by using a CCD camera with a linear lens which is included in LOS. The camera makes it possible to study the distribution of radiation intensity along the selected axis on the plane (x, y) [17–20].

The intensity distribution in the interference image is approximated as follows:

$$I_{\text{int}}(x) = I_0 \cos^2(kx), \quad (18)$$

where I_0 — maximum intensity, k — wavenumber [11].

The intensity distribution function $I(x)$ (18) is subject to fractal analysis (14)–(16). Consider the case of a linear intensity distribution: $I(x) = I_0 \times j$, where j — intensity measurement number, $j = 1 \dots m$.

The span of R and dispersion of σ computed for the increment function as follows:

$$R = \frac{I_0}{8} m^2, \quad \sigma = \frac{I_0}{2\sqrt{3}} \sqrt{m(m+1)} \quad (19)$$

It follows from the equation (16):

$$H = \ln(R/\sigma) / \ln(m/2). \quad (20)$$

Dependence of R/σ on m looks like this:

$$\ln(R/\sigma) = \ln(\sqrt{3}/4) + \ln(m) + \ln(1 - 1/2m) \quad (21)$$

Substituting (21) into (20) we obtain that for a straight line and large readings:

$$H = \lim_{m \rightarrow \infty} [\ln(R/\sigma) / \ln(m/2)] = 1. \quad (22)$$

Consequently, the value of the fractal dimension (14) $D = 1$. A similar result can be obtained for any smooth curve, for example, for a sinusoid with a period that is commensurate with m . When analyzing actual signals presented in the form of two-dimensional plots $I(x)$, the parameter D describes the degree of ruggedness of a plot $I(x)$: at high values of D the plot looks too rugged, but at low values of D the plot looks softer. The equation (18) describes a smooth and continuous curve. According to (19)–(22), the fractal dimension of function (18) is equal to 1. However, the signal in real conditions will get into the CCD lens in a form different from (18) as a result of the effect of intensity noise $I_N(x)$. Assuming that the link between signal and noise is of an additive charac-

ter, we will present the resulting signal $I_{Rez}(x)$ as follows:

$$I_{Rez}(x) = I_{Int}(x) + I_N(x). \quad (23)$$

This will increase the value of the fractal dimension by ΔD . Due to the stochastic nature of noises, their fractal dimension is higher than the fractal dimension of the desired signal. Experiments show that the fractal dimensional increment ΔD is 0,1—0,3 with a signal-to-noise ratio $q_0^2 = -3$ dB [4]. Therefore, the value of the fractal dimension of the signal (23) can be estimated as $1,1 \leq D \leq 1,3$. When a pulse is reflected from the surface without an antireflection coating, there is no interference component in the signal (23), and the signal will be stochastic, for which $D = 1,5$.

The fractal dimension is not the only tool of fractal analysis and it is capable of answering a limited range of issues; in the framework of the general task is the recognition of OSD. It is not enough to address the issue of OSD type. The group of the fractal characteristics of a specific OSD must be developed in order to recognize and classify OSD. Fractal characteristics together with the fractal dimension must include the type of fractal signatures, the type of spatial spectrum and the values of spatial frequency that characterize the signal structure.

OSD RECOGNITION SYSTEM SCHEME

The developed topological model of OSD recognition (6)—(15) is used in the system of OSD recognition developed by the laboratory «Photonics».

The laser radiation from the source (probe beam) gets into the lens of the OSD. Some part of the incident laser radiation is reflected from the lens's anti-reflection film and returns to the system. The recognition system of OSD uses laser emitters in the near-IR range to ensure that the operator of OSD could not see that he was detected. Note

that the human eye has almost zero sensitivity to radiation with a wavelength of more than 700 nm. This wavelength is actually used in laser optics detection systems in order to be invisible.

Integration of an infrared camera in the recognition system of OSD allows us to see an intense spot of light on a computer screen or a display and to record an optical device and the like. The laser unit for distance measurement and the unit for determining the coordinates of the reflected signal (equipped with a magnetic compass and a GPS receiver) make it possible to determine the distance to the OSD and its coordinates. The topological recognition model developed by the authors (6)—(15) allows identifying the type of OSD.

CONCLUSION

The paper presents the system for detection and recognition of hidden optical surveillance systems. The main algorithm of system is based on fractal insights about the structure of the optical signal and determination of the fractal dimension intensity distribution in a cross-sectional plane of the laser pulse reflected from the target. It is shown that the approximation of the fractal dimension value to unity is a prerequisite to the target classification as an optical surveillance device.

In order to classify the type of an optical device along with the fractal dimension the group of the fractal characteristics, consisting of the type of fractal signatures, the type of spatial spectrum and the values of spatial frequency that characterize the signal structure must be developed.

Recognition system of optical surveillance devices is based on the topological model of optical surveillance devices recognition. It allows measuring the distance and coordinates of a target as well as recognizing it.

REFERENCES / СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Keith J. Kasunic, Optical Systems Engineering (SPIE:2011), 464 p.
2. Warren J. Smith, Modern Optical Engineering, 4th Edition. (SPIE:2007), 768 p.
3. Walls D., Milburn G.J. Stochastic Methods (Springer.Quantum Optics: 2008), 34 p.
4. A. Barker, W.P. Syam, R.K. Leach. 31st Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering (ASPE — 2016), p.594 (Portland Marriott Downtown Waterfront Portland; United States: 2016).
5. Sijiong Zhang, Changwei Li, Shun Li. The latest image processing techniques (SPIE:2017), 294 p.
6. D. Malacara Hernández, Advanced Optical Instruments and Techniques. (CRC Press: 2018), 792 p.
7. Yu.P. Machehin, Yu.S. Kurskoy, Basics of nonlinear metrology. (LAP Lambert Academic Publishing: 2014), 162 p.
8. Yu.P. Machehin, Yu.S. Kurskoy, Measuring technique, 57 No. 6, 609 (2014).
9. Yu.P. Machehin, Yu.S. Kurskoy, A.S. Gnatenko, V.A. Tkachenko, Telecommunications and Radio Engineering 77 No 3, 1179 (2018).
10. Y.S. Kurskoy, Y.P. Machehin, A.S. Gnatenko, J. Nano- and Electron. Phys. 10 No 5, 05030 (2018).
11. Lu L. Joannopoulos, Nature Photonics 8, 821 (2014).
12. Yu.P. Machehin, Yu.S. Kurskoy, A.S. Gnatenko, Telecommunications and Radio Engineering. 77 No18, 1631 (2018).
13. R.M. Kronover. Fractals and chaos in dynamic systems. (M.: Postmarker:2000), 352 p.
14. G.C. Layek, An Intriduction to Dynamical Systems and Chaos, Springer, 622 p., 2015.
15. M. Tchoffo, A.G. Tene, Chaos, Solitons and Fractals 140, 110110 (2020).
16. Y. Beiderman, M.Teicher, J.Garsia, V.Mico, Z.Zalevsky, Optics Communications 283, 4274 (2010).
17. G.S. Landsberg. Optics. 6th ed., Stereo. M.: FIZMATLIT, 848 p., (2003).
18. José A. Rivera, Thomas C. Galvin, Austin W. Steinforth & J. Gary Eden, Nature Communications 9, 2594 (2018).
19. G.S. McDonald, J.M. Christian, T.M. Walsh and J.G. Huang, 11th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2011), 1 (Kharkiv: 2011).
20. M.A. Yates, G.H.C. New, Opt. Commun. 208, 377 (2002).
21. M. Segev, M. Soljačić, J. Dudley, Nature Photon 6, 209 (2012). 

Отримано / received: 26.02.2021.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-мат.н., проф. І.М. Бондаренком, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
Prof. I.M. Bondarenko, D. Sc. (Phys.-mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.19-22

УДК 53.08:620.178.5

ОГЛЯД ПРИЛАДІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ ВІБРАЦІЙ

Inspection of Devices and Methods of Measurement and Prevention of Vibrations

В. П. Квасніков, доктор технічних наук, професор,
e-mail: kvp@nau.edu.ua

А. П. Стахова, кандидат технічних наук,
доцент,
e-mail: Angelik2003@ukr.net
Національний авіаційний університет, Київ, Україна

V. P. Kvasnikov, doctor of technical sciences, professor,
e-mail: kvp@nau.edu.ua

A. P. Stakhova, candidate of technical sciences,
associate professor,
e-mail: Angelik2003@ukr.net
National aviation university, Kyiv, Ukraine

За даними зарубіжних та вітчизняних дослідників (60—80) % поломок авіаційної та космічної техніки викликані усталеними змінами у виробках під дією періодичного вібраційного навантаження. У роботі проведено аналіз виникаючих вібрацій і наявних приладів і методів для їх вимірювання та боротьби з ними. Отримані результати дозволяють розширити представлення стосовно вібраційних випробувань конструкцій з пониженням запасом міцності, застосовуваних, наприклад, за створення космічних апаратів.

According to foreign and domestic researchers, (60—80) % of breakdowns in aviation and space technology are caused by constant changes in products under the action of periodic vibration load. Examinations of orientation and navigation devices used in the aerospace industry are associated with modeling in the laboratory of various modes of movement of objects on which further operation of the devices is planned. This kind of examination is an important stage of preparation for operation and has a goal to check the performance, functional reliability

of the product in real conditions of use. In order to extend the service life, increase the reliability and efficiency of the installed equipment, it is necessary to diagnose defects at an early stage of their development. Occurrence and development of defects in most cases is accompanied by change of parameters of vibration of its elements. Therefore, one of the most universal and advanced techniques is vibration diagnostics, namely detection of defects based on the analysis of the vibration characteristics of the machine elements. In some cases, vibration is not only an indicator but also the cause of defects. In some situations, the vibration builds up like an avalanche and requires an emergency stop to prevent breakage. The analysis of the emerging vibrations and existing devices and methods for their measurement and control is carried out in the work. The obtained results allow to expand the idea of vibration tests of structures with a reduced margin of safety, used, for example, in the creation of spacecraft. This will allow raising to a new level the issues of metrological support and improving the accuracy of measurements in vibration diagnostics to identify incipient defects at an earlier stage.

Ключові слова: вібрація, вібродіагностика, вимірювальне перетворення, методи вимірювання вібрації.
Keywords: vibration, vibration diagnostics, measuring conversion, methods of vibration measurement.

ВСТУП

За сучасних умов приладобудування потребує проведення випробувань приладів і систем за умов максимальної реалістичності, тобто наближених до реальних умов експлуатації для забезпечення його конкурентної здатності. В комплексі заходів щодо забезпечення необхідної якості продукції, що випускається, і забезпечення безпеки в процесі експлуатації складних машин і механізмів важливе місце займають динамічні випробування та вібродіагностика.

Періодична вібродіагностика, що проводиться в процесі експлуатації промислового устаткування, дозволяє виявляти несправності більшості машин і механізмів задовго до того моменту, коли відмова може призвести до катастрофічних наслідків, тобто забезпечувати експлуатацію складного устаткування в стані, що відповідає технічним умовам.



В. П. Квасніков



А. П. Стахова

Віб्राції виникають зазвичай під час роботи машин і механізмів, що мають невірні балансовані обертові частини або здійснюють зворотно-поступальний рух. У процесі роботи такого обладнання вібрація відіграє негативну роль. Знакозмінні напружки, зумовлені вібрацією, сприяють накопиченню пошкоджень у матеріалах, появі тріщин і руйнувань.

Вібрація, що виникає в процесі експлуатації технічного обладнання, механізмів і систем, спотворює основний рух елементів обладнання, породжуючи нестійкість заданого закону руху, в свою чергу призводячи до відмови всієї системи. Окрім того, під час роботи технологічного обладнання виникає динамічний тиск, який зумовлює збільшення тертя в точках опори обертових валів, збільшуючи знос підшипників та створюючи додаткові напружки в окремих частинах технологічного устаткування, що призводить до втоми матеріалу та його руйнування. При цьому виникає явище під назвою: поступове ослаблення нерухомих з'єднань. Це явище зумовлює малі відносні зсуви у з'єднаннях деталей технологічного обладнання, що призводить до зміни структури поверхні шарів порівнянних деталей, їх знос і, як результат, зменшення сили тертя в з'єднаннях, що зумовлює зміну дисипативних властивостей об'єкта, зміщення його власних частот і т.д. Для заміни деталей, які піддаються тривалому впливу вібрацій, необхідно проводити технічне обслуговування, що вимагає таких ресурсів, як час і фінансові витрати. Вібрації можуть зумовлювати повну відмову технологічного обладнання, якщо не проводити технічного обслуговування.

Вібродіагностика є одним з основних методів неруйнівного контролю. За допомогою цього методу можна контролювати обладнання, діагностувати несправності, прогнозувати подальший розвиток несправностей устаткування. Перевагою вібродіагностики є контроль параметрів поточного стану машинного обладнання в процесі експлуатації без його демонтажу [1].

Метою роботи є проведення аналізу виникаючих вібрацій та сучасних методів та пристроїв для вимірювання параметрів від зовнішніх вібраційних впливів, що визначаються вібродіагностикою.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На сьогодні вимірювання визначають як отримання значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання дає можливість кількісного представлення величин і незалежно від вимірюваної величини, методу і засобу вимірювань зводиться до порівняння дослідним шляхом розміру деякої величини з розміром подібної їй величини, прийнятої за одиницю [2].

Основою будь-якого вимірювання є вимірювальне перетворення, за якого між розмірами двох величин встановлюється взаємоднозначна відповідність. Вимірювальне перетворення, як правило, здійснюють технічними пристроями — перетворювачами. Перетворювану величину називають вхідною, а перетворену — вихідною величиною. Перша із вхідних величин є такою, що сприймається. Вимірюваною називають фізичну величину, що підлягає вимірюванню. У загальному випадку не будь-яка величина, що сприймається, є вимірюваною. Часто вимірювана величина тільки функціонально пов'язана з тією, що сприймається, і визначається із останньої за допомогою спеціального перетворення. Це має місце, наприклад, під час вимірювань частоти або періоду гармонічної величини, спектральної щільності випадкового процесу і т.д. У ряді випадків ці величини збігаються, наприклад, коли вимірюваними параметрами є миттєві значення величини, що сприймається.

Розрізняють абсолютні й відносні вимірювання. Вібрацію, параметри якої вимірюють щодо рухомої системи відліку, називають відносною. Вібрація деталей, що коливаються одна відносно іншої, є відносною. Вібрацію, параметри якої вимірюють щодо системи відліку, прийнятої з тим або іншим ступенем точності за інерційну, називають абсолютною. Для більшості технічних вимірювань за інерційну систему відліку можна прийняти систему відліку, нерухому відносно Землі. Іноді кажуть про вимірювання параметрів вібрації у відносних і абсолютних координатах [3].

Під час вимірювань параметрів вібрації використовуються вібродатчики, що сприймають механічні коливання, які за допомогою різноманітних технологій перетворюють до відповідного електричного потенціалу. Основними параметрами вібрації, що вимірюються, є: амплітуда вібропереміщення (X), амплітуда коливальної швидкості (віброшвидкості) (V), амплітуда коливального прискорення (віброприскорення) (a), період коливань (T), частота коливань (f).

У наслідок специфічних властивостей визначальним за оцінки впливу вібрації є діючі значення перерахованих вище параметрів. Так, діюче значення віброшвидкості є середньоквадратичне миттєвих значень швидкості $V(t)$ за час усереднення t_y , яке вибирають з урахуванням характеру зміни віброшвидкості у часі:

$$V_y = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_t^{t+t_y} V^2(t) dt}.$$

Отже, для характеристики вібрацій використовують спектри діючих значень параметрів або середніх квадратів останніх.

У практиці віброакустичних досліджень весь діапазон частот вібрацій розбивають на октавні діапазони. В октавному діапазоні верхня гранична частота вдвічі більша нижньої $f_2/f_1 = 1$. Аналіз і побудова спектрів параметрів вібрації можуть проводитися також у трьохоктавних смугах частот — $f_2/f_1 = \sqrt{2}$. Якщо f_1 — нижня гранична частота, а f_2 — верхня, то як частота, що характеризує смугу в цілому, береться середньгеометрична частота $f = \sqrt{f_1 \times f_2}$.

Середньгеометричні частоти октавних смуг частот вібрації стандартизовані й становлять: 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000 Гц.

Оскільки абсолютні значення параметрів, що характеризують вібрацію, змінюються в дуже широких межах, у практиці використовують поняття логарифмічного рівня коливань. Логарифмічний рівень коливань — характеристика коливань, що порівнює дві однойменні фізичні величини, пропорційні десятичному логарифму відношення оцінюваного і вихідного значення величини. Як вихідні використовуються опорні значення параметрів, прийняті за початок відліку. Вимірюються рівні в дБ. Тоді рівень віброшвидкості визначатиметься за формулою:

$$L_v = 20 \lg(V^2/V_0^2) = 20 \lg(V_y/V_0),$$

де V_y — усереднене значення віброшвидкості у відповідній смузі частот; V_0 — опорне значення віброшвидкості, що дорівнює 5×10^{-4} м/с, міжнародна стандартна величина [4].

Рівень віброприскорення визначається виразом:

$$L_a = 20 \lg(a/10^{-6}).$$

Динаміка руху апаратів аерокосмічної галузі є складною, що зумовлено складними траєкторіями та наявністю змінних навантажень. Це викликає значні труднощі у розробленні, проектуванні, виготовленні випробувальних стендів, що імітують реальні умови.

Сучасні компанії займаються виготовленням та реалізацією обладнання, призначеного для вимірювання та боротьби з вібраціями. Серед цього обладнання — віброметри, віброаналізатори, балансувальні верстати, вібраційні стенди. Сьогодні наука і промисловість у всьому світі накопичили великий досвід вирішення таких проблем. Лідери в цій галузі: *Ideal Aerosmith* (США), *Acutronic* (Швейцарія), — мають у своєму арсеналі повний спектр випробувального обладнання, від малих поворотних столів і закінчуючи великими багатовісними стендами для моделювання та імітації польоту [5].

Виділяють два основні методи вимірювання вібрації: кінематичний і динамічний.

Суть кінематичного методу полягає в тому, що відносно нерухомої системи координат вимірюються координати точок об'єкта. Вимірювальні перетворювачі, засновані на цьому методі вимірювання, називають перетворювачами відносної вібрації.

Динамічний метод заснований на тому, що параметри вібрації вимірюють щодо штучної нерухомої системи відліку, більшості випадків інерційного елемента, пов'язаного з об'єктом через пружний підвіс. Такі прилади називають перетворювачами абсолютної вібрації.

Вимірювальні перетворювачі вібрації засновані на різних фізичних принципах перетворення механічних коливань в електричний сигнал (таблиця) [6].

У безконтактних вимірювачах реалізують кінематичний метод вимірювання параметрів відносної вібрації на основі використання оптичних радіохвильових та інших електромагнітних полів.

Вимірювання параметрів вібрації, засноване на вимірюванні частоти випромінювання оптичного квантового генератора, відбитого від об'єкта, проводять вимірювальними пристроями, дія яких заснована на використанні ефекту Доплера.

Перетворювачі значень вібрації в електричний сигнал ділять на два класи: генераторні, що перетворюють енергію механічних коливань в електричну; параметричні, що перетворюють механічні коливання в зміни параметрів електричних ланцюгів, наприклад, індуктивності, ємності, активного опору, частоти або зсуву фаз і т.д.

П'єзоелектричні перетворювачі застосовують для виміру параметрів абсолютних коливань необертливих частин механізмів.

Типи вимірювальних перетворювачів

Types of measuring transducers

	Перетворювачі абсолютної вібрації	Безконтактні вимірювачі відносної вібрації
Генераторні	П'єзоелектричні	Магнітні
	Індукційні	Радіохвильові
	На основі ефекта Хола	Електромагнітні
Параметричні	Резисторні	Електромагнітні
	П'єзорезисторні	Акустичні
	Індуктивні	Радіаційні
	Трансформаторні	Оптичні
	Магнітопружні	
	Ємнісні	
	Імпедансні	
	Вібраційно-частотні	
	Електронно-механічні	

П'єзоелектричні перетворювачі мають ряд переваг: високі метрологічні властивості, широкі амплітудний і частотний діапазони, високу надійність, відносно низьку вартість.

Вони дозволяють проводити вимірювання з високою точністю в діапазоні низьких частот і стосовно великих амплітуд вібрації, але внаслідок своєї високої інерційності, що призводить до спотворення форми сигналу, унеможливорює вимір вібрацій високої частоти і малих амплітуд. Окрім того, якщо маса досліджуваного об'єкта, а отже, і його інерційність невелика, то такий датчик може істотно впливати на характер вібрації, що вносить додаткову помилку у вимірювання.

Основними їх недоліками є високий вихідний опір та низька перешкодозахисність.

Електродинамічні перетворювачі застосовують для вимірювання параметрів вібрації у частотному діапазоні вимірювання від 1 Гц до 2 кГц.

Електродинамічний перетворювач містить магнітну систему, в зазорі якої розміщена котушка з дротом. Зазвичай магнітна система закріплена на підставі, а котушка жорстко з'єднана з сейсмічною масою.

Найчастіше, в сучасному вібродіагностичного обладнанні використовуються датчики вібрації

з п'єзоелектричними перетворювачами, нижче буде розглянуто обладнання, яке працює з таким видом перетворювачів [6].

Сучасні випробувальні стенди — це складні мехатронні системи, в яких гармонійно поєднуються закони механіки, електроніки та теорії автоматичного управління [7, 8].

Для послаблення вібрацій істотне значення має запобігання резонансним режимам роботи з метою виключення резонансу з частотою збуджувальної сили. Власні частоти окремих конструктивних елементів визначаються розрахунковим методом, за відомими значеннями маси та жорсткості, або ж експериментально на вібраційних стендах [9].

Зменшити рівень вібрації можна методами частотного відстроювання, вібродемпфування та вбудовуванням додаткових пристроїв у конструкцію засобу, що підлягає захисту від вібрацій, віброзгашування.

ВИСНОВОК

У процесі роботи, як ознайомлення, проведено огляд, що включає сучасні методи вимірювання та боротьби з вібрацією. Описано прилади для вимірювання вібрацій. Коротко представлено їх характеристики, достоїнства і недоліки, описано сфери їх застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Левит М.Е. Балансировка деталей и узлов / М.Е. Левит, В.М. Рыженков. — М.: Машиностроение (Levyt M.E. Balansirovka detalei y uzlov / M.E. Levyt, V.M. Ryzhenkov. — М.: Mashynostroeniye), 1986. — 248 с.
2. Лавендел Э.Э. Вибрации в технике. Вибрационные процессы и машины / Э.Э. Лавендел, И.И. Артоболевский. Справочник в 6 томах. — М.: Машиностроение (Lavendel Э.Э. Vybratsyy v tekhnike. Vybratsyonnye protsessy y mashyny / Э.Э. Lavendel, Y.Y. Artolevskiy. Spravochnik v 6 tomakh. — М.: Mashynostroeniye), 1981. — 509 с.
3. Диментберга Ф.М. Вибрации в технике. Колебания машин, конструкций и их элементов / Ф.М. Диментберга, К.С. Колесников. Справочник в 6 томах. — М.: Машиностроение (Dymentberha F.M. Vybratsyy v tekhnike. Kolybaniya mashyn, konstruktsiy y ykh elementov / F.M. Dymentberha, K.S. Kolesnykov. Spravochnik v 6 tomakh. — М.: Mashynostroeniye), 1980. — 544 с.
4. Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Прокопенко Л.В. Человек и шум. — Москва: ГЭОТАР-МЕД (Yzmerov N.F., Suvorov H.A., Prokopenko L.V. Chelovek y shum. — Moskva: H3OTAR-MED), 2001. — 384 с.
5. Carter R. Weighted Least-Squares Based Control for a Four Axis Gimbal Set / R. Carter, P. Duffey, S. Bachorski, M. Kagi, H. Havlicsek // Proceedings of SPIE (Carter R. Weighted Least-Squares Based Control for a Four Axis Gimbal Set / R. Carter, P. Duffey, S. Bachorski, M. Kagi, H. Havlicsek // Proceedings of SPIE). — 2010. — Vol. 7663. — P. 1—12.
6. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. — М.: Библиогр (Shyрман A.R. Prakticheskaya vybrodyagnostyka y monitorynh sostoianiya mekhanicheskoho oborudovaniya / A.R. Shyрман, A.B. Solovev. — М.: Byblyohr), 1996. — 276 с.
7. Герман-Галкин С.Г. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. — СПб.: Корона-Век (Herman-Halkyn S.H. Proektyrovanye mekhatronnykh system na PK / S.H. Herman-Halkyn. — SPb.: Korona-Vek), 2008. — 368 с.
8. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / Д.М. Калихман; под общ. ред. акад. В.Г. Пешехонова — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор» (Pretsyzionnye upravliaemye stendy dlia dynamicheskikh uspytanyi hyroskopycheskyykh pryborov / D.M. Kalykhman; pod obshch. red. akad. V.H. Peshekhonova — SPb.: HNTs RF TsNYU «Электронприбор»), 2008. — 296 с.
9. Основи охорони праці / В.Ц. Жидецький, В.С. Джигирей, О.В. Мельников — Вид. 2-е, стереотипне. — Львів: Афіша (Osnovy okhorony pratsi / V.Ts. Zhydetskiy, V.S. Dzhyhyrei, O.V. Melnykov — Vyd. 2-e, steryotypne. — Lviv: Afisha), 2000. — 348 с.

Отримано / received: 02.01.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.О. Подчашинським, Державний університет «Житомерська політехніка» (Україна).

Prof. Yu.O. Podchashynskyi, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.23-29

УДК 004.7:004.891

МОНІТОРИНГ СТАЛОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ Й ОПРАЦЮВАННЯ ЗАХОДІВ ЗАХИСТУ ВІД НЕБЕЗПЕК

Monitoring the Sustainability of Information and Telecommunication System and Elaboration of Measures to Protect from Dangers

В. В. Жебка, кандидат технічних наук, доцент,
Державний університет телекомунікацій,
м. Київ, Україна,
email: viktoria_zhebka@ukr.net

П. В. Анахов, інженер,
ПрАТ «Національна енергетична компанія «Укренерго»,
м. Київ, Україна,
email: anakhov@i.ua

V. V. Zhebka, candidate of technical sciences, docent,
State University of Telecommunications,
Kyiv, Ukraine,
email: viktoria_zhebka@ukr.net

P. V. Anakhov, engineer,
National power company «Ukrenergo»,
Kyiv, Ukraine,
email: anakhov@i.ua

До основних принципів діяльності, які забезпечують можливість встановлення зв'язку між споживачами телекомунікаційної мережі, віднесено гарантування її сталості, яка полягає в збереженні функціонування за виходу з ладу частини об'єктів. Серед можливих напрямів діяльності в цьому напрямку, зважаючи на мінливість сучасного природно-антропогенного середовища, перспективним убачається вдосконалення систем збору, опрацювання та використання метрологічної інформації щодо сталості функціонування.

Систематизовано події, які зумовлюють стан мережі, й побудовано причинно-наслідкову діаграму порушень доступності на фоні відновлення автономної роботи.

Розроблено універсальну схему застосування заходів захисту від прогнозованих небезпек. Розглянуто перспективи застосування штучного інтелекту у процесі опрацювання заходів захисту від небезпек за умов мінливості природно-антропогенного середовища.

Досліджено методику розрахунку зв'язності шляху з урахуванням відмов засобів зв'язку.

The main principles of activity, which provide the ability to establish communication between consumers of the telecommunications network, include ensuring its sustainability, which is to maintain the functioning in the event of failure of some facilities. Among the possible areas of activity in this direction, given the variability of the modern natural and anthropogenic environment, considered promising the improvement of systems for collecting, processing and using metrological information on the sustainability.

We systematized the events, which determine the state of the network, and built a causal diagram of violations against the background of the restoration of autonomous work.

We developed a universal scheme for the application of protection measures against forecasted hazards. Prospects for the use of artificial intelligence in the development of measures to protect against hazards, with considered of the variability of the natural and anthropogenic environment are considered.

The method of calculating the connectivity of the path taking into account the failures of communication means was studied.

Ключові слова: заходи захисту від небезпек, зв'язність, мінливість природно-антропогенного середовища, причинно-наслідкова діаграма, сталість функціонування телекомунікаційної мережі, штучний інтелект.

Keywords: protection measures against hazards, connectivity, variability of natural and anthropogenic environment, causal diagram, sustainability of functioning of telecommunication network, artificial intelligence.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відповідно до Рекомендації Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ) E.800 «Якість телекомунікаційних послуг: концепції, моделі, цілі та планування надійності» показником роботи телекомунікаційної мережі є її можливість забезпечувати функції, пов'язані зі встановленням зв'язку між кінцевим обладнанням [1].

Через пандемію Covid-19 багато компаній розбудовують віддалену роботу зі своїми співробітниками. Запроваджена дистанційна форма навчання.



В. В. Жебка



П. В. Анахов

Таблиця 1. Характер відмов у наданні функціональних послуг за дії загроз доступності ІТС або інформації [5]
 Table 1. The nature of refusals to provide functional services due to threats to the availability of ITS or information [5]

Послуга	Пояснення характеру відмови у наданні послуги
Стійкість до відмов	Порушується можливість використання інформації, окремих функцій або ІТС у цілому після відмови її компоненти
Використання ресурсів	Споживачам телекомунікаційних послуг забороняється керувати використанням послуг і ресурсів
Гаряча заміна	Порушується можливість використання інформації, окремих функцій або ІТС у цілому в процесі заміни окремих компонентів
Відновлення після збоїв	Не гарантується повернення ІТС у відомий захищений стан після відмови або переривання обслуговування

Це призвело до сплеску навантаження на телекомунікаційну мережу.

З іншого боку, старіння обладнання, кліматичні зміни, зростання масштабів господарської діяльності, війна на Донбасі зумовлюють підвищену аварійність засобів зв'язку.

За Законом України «Про телекомунікації» до основних принципів діяльності, які забезпечують можливість встановлення зв'язку між споживачами телекомунікаційної мережі, віднесено гарантування її сталості, яка полягає у збереженні функціонування у випадку виходу з ладу частини об'єктів. Серед можливих напрямів діяльності в цьому напрямку, зважаючи на мінливість сучасного природно-антропогенного середовища, перспективним убачається вдосконалення систем збору, опрацювання та використання метрологічної інформації щодо сталості функціонування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасною основою розвитку телекомунікаційної мережі, на додаток до будівництва магістральних волоконно-оптичних каналів зв'язку, наземних і космічних каналів зв'язку, систем радіорелейного і лазерного зв'язку, переходу на цифрові технології передавання, створюються інформаційно-телекомунікаційні системи (ІТС) [2].

ІТС є поєднання інформаційної та телекомунікаційної систем, що в процесі збору, опрацювання та використання інформації діють як єдине ціле [3]. Необхідність централізації бізнес-процесів, ефективного опрацювання великих масивів даних з прийняттям обґрунтованих рішень, надійного функціонування баз даних (БД) визначає створення потужного інформаційно-обчислювального центру опрацювання даних (ЦОД), здатного виконувати збір, опрацювання, використання інформації й управління телекомунікаційною мережею.

Сукупність організаційно-технічних заходів і правових норм для запобігання заподіяння шко-

ди інтересам власника інформації ІТС та осіб, які користуються інформацією, забезпечує комплекс заходів, спрямованих на захист інформації [4]. В контексті критеріїв захищеності інформації інформаційно-телекомунікаційна система розглядається як групи функціональних послуг: конфіденційність, цілісність, доступність, спостереженість [5].

Загрози доступності відносяться до порушення можливості використання ІТС або опрацюваної інформації. Перелік функціональних послуг і характер відмов у їх наданні представлено у таблиці 1.

На рис. 1 у формі причинно-наслідкової діаграми (діаграми Ішикави) представлено першопричини порушень доступності (небезпечні події НП) ІТС на фоні відновлення її автономної роботи.

Перелік подій, які зумовлюють стан ІТС, представлено у таблиці 2.

Небезпечні події продукують дестабілізуювальні чинники (ДЧ), які характеризуються фізичними, хімічними і біологічними діями чи проявами, що визначаються або виражаються відповідними параметрами [11].

Сталість одиночних ресурсів ІТС до дії дестабілізуювальних чинників забезпечується за умови недопущення настання граничного стану [12]:

$$S(\vec{r}, t) \geq F(\vec{r}, t), \quad (1)$$

де $S(\vec{r}, t)$ — значення критерію стійкості до дії дестабілізуювального чинника (ДЧ), $\vec{r}$ — радіус-вектор точки поля ДЧ; t — час; $F(\vec{r}, t)$ — значення ДЧ.

Ресурси ІТС становлять станції і вузли розмірності n , які є множиною вершин графа телекомунікаційної

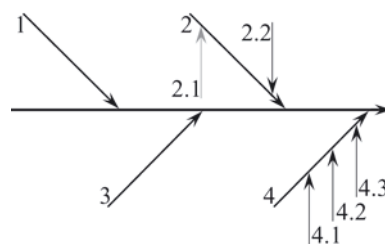


Рис. 1. Діаграма подій, які зумовлюють стан ІТС
 Fig. 1. Diagram of events that determine the state of ITS

Таблиця 2. Події, які зумовлюють стан ІТС
Table 2. Events that determine the state of ITS

Подія	Пояснення
1. НП — Несправність, спричинена відмовою, викликану процесами старіння і/або зношування, що відбуваються всередині об'єкта [6]	– старіння — природний процес необоротної зміни властивостей матеріалів у процесі зберігання, перевезення і експлуатації виробів [7]; – зношування — особливий вид руйнування виробів унаслідок їх механічного тертя один об одного або дії електричного струму [7]
2. Діяльність людини-оператора (людський чинник)	
2.1. Безпомилкові дії у діяльності людини-оператора [8, 9]	Позитивний вплив людини в результаті дій, виконаних або невиконаних, які призвели до запобігання, виявлення і ліквідації відмов складових елементів ІТС [9]
2.2. НП — помилкові дії у діяльності людини-оператора [8, 9]	Негативний вплив людини в результаті дій, виконаних або невиконаних, які призвели до відмови складових елементів ІТС [9]
3. НП — зовнішні події природного характеру [10]	Пошкодження, пов'язані з небезпечним геофізичним, геологічним, метеорологічним або гідрологічним явищем, деградацією ґрунтів чи надр, пожежею в природних екологічних системах, зміною стану повітряного басейну, інфекційною захворюваністю та отруєнням людей, інфекційним захворюванням свійських тварин, масовою загибеллю диких тварин, ураженням сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками тощо [10]
4. Зовнішні події антропогенного характеру:	
4.1. НП — пошкодження техногенного характеру [10]	Пошкодження внаслідок транспортної аварії (катастрофи), пожежі, вибуху, аварії з викиданням (загрозою викидання) небезпечних хімічних, радіоактивних і біологічно небезпечних речовин, раптового руйнування споруд; аварії в електроенергетичних системах, системах життєзабезпечення, системах телекомунікацій, на очисних спорудах, у системах нафтогазового промислового комплексу, гідродинамічних аварій тощо [10]
4.2. НП — пошкодження соціального характеру [10]	Пошкодження, спричинені протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування або пов'язані із зникненням (викраденням) зброї та небезпечних речовин, нещасними випадками з людьми тощо [10]
4.3. НП — пошкодження воєнного характеру [10]	Пошкодження, спричинені застосуванням звичайної зброї або зброї масового ураження, під час якого виникають вторинні чинники ураження [10]

мережі $v_i \in V$, і каналами зв'язку між ними, що описуються множиною ребер $e_{ij} \in E$. Топологія мережі задається графом $G(V, E)$, описуваним матрицею суміжності [13]:

$$A = \|a_{ij}\|, i, j = \overline{1, n}, a_{ij} = \begin{cases} 1, \forall e_{ij} \in E; \\ 0, \forall e_{ij} \notin E. \end{cases} \quad (2)$$

Сталість функціонування ІТС, в т.ч. телекомунікаційної мережі, яка об'єднує множину одиночних ресурсів, забезпечується за виконання умов [13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi(G) \geq 2; \\ \lambda(G) \geq 2; \\ P_{ij}(t) \geq P_{ij}^{normalized}; i \neq j; i, j = \overline{1, n} \end{array} \right\}, \quad (3)$$

де $\chi(G)$ — число вершинної зв'язності (найменша кількість вершин, вилучення яких разом з інцидентними їм ребрами призводить до незв'язного чи одновіршинного графа); $\lambda(G)$ — число реберної зв'язності (найменша кількість ребер, вилучення яких призводить до незв'язного графа); $P_{ij}(t)$ — імовірність зв'язності (ймовірність того, що повідомлення з вузла i у вузол j буде передане за час, який не перевищує t).

Сталість засобів зв'язку зумовлюють чотири основні фактори: безвідмовність; вибір трас прокладки і підвіски, забезпечення збереження кабельних ліній зв'язку; автоматичне ввімкнення резерву; процедури технічного обслуговування [14].

Безвідмовність засобів описується наробітком між відмовами t_r [15].

Сталість кабельної лінії можна визначати характеристиками надійності кабелю та умовами його експлуатації. До причин відмов відносять такі [16]:

- вандалізм (у першу чергу, по відношенню до підземних кабелів з металевими елементами, які виявляються за допомогою металопрошукачів, і повітряних кабелів);
- прихований брак у процесі виробництва;
- неякісні будівельні роботи або монтаж;
- помилки проектування (неправильний вибір типу кабелю, невідповідна арматура, невідповідність технічних вимог умов експлуатації).

Відмови і відключення ресурсів інформаційно-телекомунікаційної системи повинні автоматично

виявлятися і нейтралізуватися внаслідок дублювання найбільш відповідальних вузлів і станцій та, за можливістю, внаслідок реконфігурації [15].

Технічне обслуговування та ремонт ресурсів здійснюються згідно з:

- Правилами технічної експлуатації первинної мережі Єдиної національної системи зв'язку КНД 45-112-99 [17],

- Правилами технічної експлуатації електроустановок підприємств електрозв'язку України (від 29.10.1996 №232) [18],

- Правилами технічної експлуатації електричних станцій і мереж ГKD 34.20.507-2003 [15],

і включають оперативний контроль технічного стану лінійних споруд та проведення періодичних планово-профілактичних і поточних робіт, направлених на підтримання їх працездатності та справності, попередження пошкоджень, їх виявлення та своєчасне усунення.

НЕВИРІШЕНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ

Доповнення телекомунікаційної мережі інформаційною системою дозволяє проводити централізований моніторинг стану мережі, зокрема автоматично виявляти відмови і відключення об'єктів. Скоротити витрати на технічне обслуговування та ремонт дозволяє виконання робіт силами власних оперативно-виїзних бригад або сторонніми виконавцями на умовах субпідряду (аутсорсинг).

Однак, суттєвим недоліком поєднання широко впровадженого централізованого збору інформації щодо об'єктів мережі й їх ремонту є підвищення термінів відновлення:

- ♦ реалістичним, залежно від організації спостереження за відмовами, доступу до місця пошкодження, готовності персоналу, погодних умов тощо, є середній час ремонту 48 годин [16];

- ♦ середня тривалість відновлення об'єктів Південної магістралі мультисервісної корпоративної мережі зв'язку органів влади на території Брянської області, залежно від відстані до об'єкта (до 260 км), коливається в межах (2–12) год. [19];

- ♦ різними нормативами встановлюється тривалість відновлення волоконно-оптичної лінії зв'язку від 5 до 48 годин [16];

- ♦ згідно із статистикою, тривалість відновлення працездатного стану кабелю, з урахуванням його траси та довжини кабельної ділянки, становить приблизно 95% часу непрацездатності всієї системи [14].

Для порівняння — прийнятний середній час ремонту засобів зв'язку безпосередньо на місці їх розміщення становить 4 години [16].

Метою статті є вдосконалення системи збору, опрацювання та використання метрологічної інформації щодо сталості функціонування інформаційно-телекомунікаційної системи за умов мінливості природно-антропогенного середовища для прискорення опрацювання заходів захисту від небезпек.

УНІВЕРСАЛЬНА СХЕМА ЗАСТОСУВАННЯ ЗАХОДІВ ЗАХИСТУ ВІД ПРОГНОЗОВАНИХ НЕБЕЗПЕК

Інформація щодо значення дестабілізуючих чинників, які продукуються небезпечними подіями, і результати їх дії збираються ЦОДами. Ця інформація становить статистику роботи телекомунікаційної мережі й доповнює БД. За результатами опрацювання отриманої інформації складається прогноз небезпеки і опрацьовуються дії стосовно її ліквідації.

Досліджено, що для зменшення небезпеки ураження блискавкою можна застосовувати:

- * короткострокове прогнозування та оповіщення стосовно небезпеки ударів;

- * довгострокове прогнозування і встановлення суворого порядку будівельних норм в районах підвищеного ризику.

Схему застосування заходів блискавкозахисту подано на рис. 2.

На рис. 3 представлено відповідну схему рис. 2 узагальнену універсальну схему застосування заходів захисту від будь-якої можливої небезпеки.

Локалізовані прогнози небезпек, отримані в результаті моніторингу об'єктів телекомунікаційної

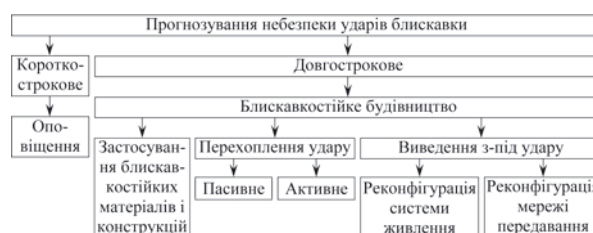


Рис. 2: Схема застосування заходів блискавкозахисту [20]

Fig. 2: Lightning protection scheme [20]



Рис. 3. Універсальна схема застосування заходів захисту від прогнозованої небезпеки

Fig. 3. Universal scheme of application of measures of protection against the forecasted danger

мережі, складають основу для районування охоплених телекомунікаційними послугами територій за ознакою ризику появи визначених загроз.

Під час розроблення проєктів захисту територій як базовий критерій повинна бути покладена концепція розумної достатності. Її сенс полягає в тому, щоби за мінімального використання коштів та заходів захисту, забезпечити вимоги з електромагнітної сумісності, функціональної та інформаційної безпеки електронних систем мережі за умов передбачуваного впливу.

Розроблення заходів захисту від дії дестабілювальних чинників залежить від таких факторів:

- інтенсивності дії у відповідному місці;
- оцінки рівня вразливості об'єкта;
- вартості обладнання, що захищається.

Оптимальним рішенням з економічної точки зору для забезпечення надійності захисту об'єктів визначено зонну концепцію організації захисту.

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ЗА ОПРАЦЮВАННЯ ЗАХОДІВ ЗАХИСТУ ВІД НЕБЕЗПЕК

Сучасність відрізняє зростаюча кількість катастроф природного характеру, які зумовлені глобальною зміною клімату на Землі. Екстремальні природні катаклізми відбуваються в кожному з регіонів світу, і збитки від них можуть вимірюватися значними сумами. Такі зміни визначають необхідність вироблення рекомендацій щодо захисту однієї з основних галузей сучасного виробництва — телекомунікацій.

Мінливість природного середовища може зумовлювати зміни інтенсивності, потужності й переліку загроз. Глобальне потепління клімату є фактором, який сприяє прискоренню інвазійного процесу, наявні відомості щодо «агресії» інвазивних видів по відношенню до телекомунікаційного обладнання. Сейсмічність регіонів значною мірою визначають мікросейсмічні коливання літосфери, які зумовлені зсувом спектра частот власних коливань водою, що в свою чергу залежать від рівня води [21].

Починаючи з (1920—30) років, почала зростати кількість катастроф антропогенного характеру. Це пов'язують зі сплеском розвитку індустріалізації світу та промислових технологій. Найчастіше небезпека пов'язана з хімічними підприємствами, атомними і тепловими електростанціями, каналізаційними спорудами, а також складами та могильниками отрутохімікатів та токсичними відходами [22].

Таке положення речей змушує періодично переглядати перелік як природних, так і антропоген-

них загроз, аналізувати їх дію, розробляти засоби захисту.

Застосування штучного інтелекту під час опрацювання даних вимірювань за умов мінливості природно-антропогенного середовища прискорить зміни районування територій за ознакою ризику появи визначених загроз. Це, в свою чергу, дозволить прискорити реагування на зміни в частині застосування заходів захисту телекомунікаційної мережі.

Безперервно діючий аналіз даних моніторингу є багатообіцяючою технологією в процесі короткострокового прогнозування небезпек.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЗВ'ЯЗНОСТІ ШЛЯХУ

Сталість телекомунікаційної мережі в цілому і засобів телекомунікацій окремо визначає низка заходів, до яких відносять забезпечення деяких нормованих значень готовності, безвідмовності, ремонтпридатності та технічного обслуговування. Перелік, включений до рекомендації МСЕ E.862 «Планування надійності телекомунікаційних мереж» включає такі рекомендовані заходи [23]:

1) забезпечення готовності (*availability performance*);

2) забезпечення безвідмовності (*reliability performance*);

3) забезпечення ремонтів (*maintainability performance*), які характеризуються визначеними інтервалами часу t_m :

3.1) час від відмови до її виявлення $\bar{t}_{m_{01}}$ (*undetected fault time*), наприклад, у випадку прихованої відмови;

3.2) середня тривалість відновлення $\bar{t}_{m_{13}}$ (*mean time to restoration*), в т.ч.:

3.2.1) тривалість ремонту $\bar{t}_{m_{23}}$ (*active repair time*);

4) забезпечення технічного обслуговування $\bar{t}_{m_{12}}$ (*maintenance support performance*), яке характеризується визначеними інтервалами часу:

4.1) затримки логістичних процесів (*mean logistic delay*) (інтервал часу очікування технічного обслуговування, який, як правило, включає доставку деталей та інструментів; доставку, встановлення або калібрування засобів вимірювань; прибуття спеціалістів; опрацювання технічної документації; оформлення доставки; очікування транспортування; затримку в зв'язку з неприйнятними умовами навколишнього середовища тощо), в т.ч.:

4.2) затримки адміністративного характеру (*mean administrative delay*) (інтервал часу очікування логістичних ресурсів, що не включає доставки запасних частин).

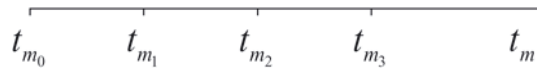


Рис. 4. Динаміка процесу відновлення засобу зв'язку
Fig. 4. Dynamics of the communication recovery process

Остаточно, процес відновлення t_m включає:

- інтервал часу від відмови до її виявлення $t_{m_{01}} = [t_{m_0}, t_{m_1}]$;
- інтервал часу очікування технічного обслуговування $t_{m_{12}} = [t_{m_1}, t_{m_2}]$;
- інтервал часу ремонту $t_{m_{23}} = [t_{m_2}, t_{m_3}]$.

Цей процес показано графічно на рис. 4.

Повна тривалість відновлення у загальному випадку становить:

$$t_m = t_{m_{01}} + t_{m_{12}} + t_{m_{23}}. \quad (4)$$

Інтервал часу відновлення t_m і часу, протягом якого система перебуває в робочому стані t_r , є складовими такого показника сталості, як рекомендований документом МСЕ G.602 «Характеристики середовища передавання» коефіцієнт готовності k [14]:

$$k = \frac{t_r}{t_r + t_m}. \quad (5)$$

Відмови засобів телекомунікацій викликають порушення зв'язності трас передавання (шляхів). Зв'язністю k_{ij}^l l -го шляху μ_{ij}^l з переліку всіх ланцюгів μ_{ij} є спільна ймовірність справного стану всіх ребер і вершин, які утворюють цей ланцюг [13]:

$$k_{ij}^l = \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^l} k_a, \quad (6)$$

де k_a — коефіцієнт готовності a -го елемента послідовності ребер і вершин, що належать шляху μ_{ij}^l .

Імовірність зв'язності шляху k_{ij} між вузлами v_i і v_j — це ймовірність справного стану хоча б одного ланцюга з усіх можливих ланцюгів [13]:

$$k_{ij} = k_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^l \in \mu_{ij}} (1 - k_{ij}^l). \quad (7)$$

За реальних умов ланцюги часто бувають взаємозалежними, тобто мають спільні ребра і вершини. При цьому ймовірність зв'язності, обчис-

лена за формулою (2), має завищене значення. Справжнє значення вийде, якщо під час обчислень за формулою (2) після розкриття дужок усі члени, які мають показники ступеня більше одиниці, замінити на одиницю, що відповідає виключенню події багаторазового урахування коефіцієнта готовності одного ребра або однієї вершини. Таку дію позначають символом E і називають поглинанням. Формула для обчислення зв'язності приймає такий вид [13]:

$$k_{ij} = E \left\{ k_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^l \in \mu_{ij}} (1 - k_{ij}^l) \right\}. \quad (8)$$

Наведена вище методика призначена для автоматизованого розрахунку зв'язності.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Систематизовано події, які зумовлюють стан інформаційно-телекомунікаційної системи, в т.ч. телекомунікаційної мережі. Побудовано причинно-наслідкову діаграму (діаграму Ішикави) порушень доступності ІТС на фоні відновлення її автономної роботи.

2. Розроблено універсальну схему застосування заходів захисту від прогнозованих небезпек. Розглянуто перспективи застосування штучного інтелекту в процесі опрацювання заходів захисту від небезпек за умов мінливості природно-антропогенного середовища.

3. Досліджено методику розрахунку зв'язності шляху з урахуванням відмов засобів зв'язку.

4. Напрацювання щодо моніторингу стійкості інформаційно-телекомунікаційної системи та її захисту від небезпек можуть розглядатися для застосування в інших мережевих структурах: електричній і каналізаційній мережах, системах водопостачання, газопостачання, трубопровідного транспорту газу, нафти, нафтопродуктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Recommendation ITU-T E.800 Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning — Terms and definitions related to the quality of telecommunication services.
2. Концепція Національної програми інформатизації (від 4.2.1998 №75/98-ВР) (Kontseptsiia Natsionalnoi prohramy informatyzatsii (dated 4.2.1998 No. 75/98-VR)) [In Ukrainian].
3. Порядок захисту державних інформаційних ресурсів у інформаційно-телекомунікаційних сис-

темах (від 24.12.2001 №76) (Porядok zakhystu derzhavnykh informatsiinykh resursiv v informatsiino-telekomunikatsiinykh systemakh (dated 24.12.2001 No. 76)) [In Ukrainian].

4. Закон України «Про захист інформації в автоматизованих системах» (від 5.7.1994 №81/94-ВР) (Zakon Ukrainy «Pro zakhyst informatsii v avtomatyzovanykh systemakh» (dated 5.7.1994 No. 81/94-VR)) [In Ukrainian].
5. НД ТЗІ 2.5-004-99 Критерії оцінки захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу (ND TZI 2.5-004-99 Kryterii otsinky

- zakhyshchenosti informatsii v kompiuternykh systemakh vid nesanktsionovanoho dostupu) [In Ukrainian].
6. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення (DSTU 2860-94 Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia) [In Ukrainian].
 7. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. — М.: Высш. шк., 1991. — 336 с. (Gludkin O.P. Metody i ustrojstva ispytaniy RJeS i JeVS. Moskva: Vysshaja shkola, 1991. 336 p.) [In Russian].
 8. ДСТУ 3899:2013 Дизайн і ергономіка. Терміни та визначення понять (DSTU 3899: 2013 Dyzain i erhonomika. Terminy ta vyznachennia poniat) [In Ukrainian].
 9. ГОСТ Р МЭК 62508-2014 Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора (GOST R MJeK 62508-2014 Menedzhment riska. Analiz vlijanija na nadezhnost' chelovecheskogo faktora) [In Russian].
 10. ДК 019:2010 Державний класифікатор України. Класифікатор надзвичайних ситуацій (від 11.10.2010, №457) (DK 019: 2010 Derzhavnyi klasyfikator Ukrainy. Klasyfikator nadzvychainykh sytuatsii (dated 11.10.2010, No. 457)) [In Ukrainian].
 11. ГОСТ Р 22.0.02-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий (GOST R 22.0.02-94 Bezopasnost' v chrezvychajnykh situacijah. Terminy i opredelenija osnovnykh ponjatij) [In Russian].
 12. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 704 с. (Polovko A. M., Gurov S. V. Osnovy teorii nadezhnosti. 2-e izd., pererab. i dop. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2006. 704 p.) [In Russian].
 13. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки (GOST R 53111-2008 Ustojchivost' funkcionirovanija seti svjazi obshhego pol'zovanija. Trebovanija i metody proverki) [In Russian].
 14. ITU-T Recommendation G.602 Transmission media characteristics. Reliability and availability of analogue cable transmission systems and associated equipments.
 15. ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. — К.: Видавництво ДП «НТУКЦ» АсЕлЕнерго, 2003. — 598 с. (HKD 34.20.507-2003 Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii i merezh. Pravyla. Kyiv: Vydavnytstvo DP «NTUKTs» AsElEnerho, 2003. 598 p.) [In Ukrainian].
 16. Комарницкий Э. И. Надежность работы волоконно-оптических сетей связи и оперативное устранение аварий // Lightwave Russian Edition. — 2005. — №4. — С. 37-43 (Komarnickij Je. I. Nadezhnost' raboty volokonno-opticheskikh setej svjazi i operativnoe ustranenie avarij. Lightwave Russian Edition. 2005, 4, p. 37-43) [In Russian].
 17. КНД 45-112-99 Правила технічної експлуатації первинної мережі ЄНСЗ. Частина третя. Правила технічної експлуатації лінійних споруд первинної мережі ЄНСЗ (KND 45-112-99 Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii pervynnoi merezhi YeNSZ. Chastyna tretia. Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii liniinykh sporud pervynnoi merezhi YeNSZ) [In Ukrainian].
 18. Правила технічної експлуатації електроустановок підприємств електрозв'язку України (від 29.10.1996 №232) (Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok pidpriemstv elektrosv'язku Ukrainy (dated 29.10.1996 No. 232)) [In Ukrainian].
 19. Лозбинева Ф. Ю., Кобышев А. П. Методика оценки готовности телекоммуникационных сетей органов власти на примере территории Брянской области // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2015. — №2(46). — С. 110-5 (Lozbineva F. Ju., Kobyshev A. P. Metodika ocenki gotovnosti telekommunikacionnykh setej organov vlasti na primere territorii Brjanskoj oblasti. Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2015, 2 (46), p. 110-5) [In Russian].
 20. Anakhov P., Makarenko A., Zhebka V., Vasylenko V., Stepanov M. Systematization of Measures on Lightning Protection of the Objects of Telecommunications Network. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2020, 9 (5), p. 7870-7. doi: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/138952020>
 21. Anakhov P., Zhebka V., Grynkevych G., Makarenko A. Protection of telecommunication network from natural hazards of global warming. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, 3/10 (105), p. 26-37. DOI: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/206692>
 22. Опанасюк Ю. А. Еколого-економічна оцінка техногенних катастроф: дис. ... канд. економ. наук: 08.00.06 «економіка природокористування та охорони навколишнього середовища». Суми, 2015. 243 с. (Opnasiuk Yu. A. Ekoloho-ekonomichna otsinka tekhnogenykh katastrof: dys. ... kand. ekonom. nauk: 08.00.06 «ekonomika pryrodokorystuvannia ta okhorony navkolyshnoho seredovyscha». Sumy, 2015. 243 p.) [In Ukrainian].
 23. ITU-T Recommendation E.862 Dependability planning of telecommunication networks. 

Отримано / received: 19.12.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Л.Б. Беркманом, Державний університет телекомунікацій, м. Київ, Україна.

Prof. L.B. Berkman, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.30-36

УДК 681.786

АНАЛІЗ ВІДЕОВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВИГОТОВЛЕННЯ РІЗНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ

Analysis of Video Measuring Systems for Control the Manufacture of Multi-Profile Parts

С. В. Прокопченко, головний науковий співробітник,
e-mail: lodrins@gmail.com

В. Б. Воскресенський, старший науковий співробітник,
e-mail: vova.komarova@gmail.com

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ

S. V. Prokopchenko, chief researcher,
e-mail: lodrins@gmail.com

V. B. Voskresenskyi, senior researcher,
e-mail: vova.komarova@gmail.com

The Ukrainian scientific and research Institute of special equipment and forensic expertise of the Security Service of Ukraine, Kyiv

Викладено аргументи щодо необхідності систематичного контролю під час виготовлення різнопрофільних деталей. Виконаний аналіз останніх досліджень і публікацій за тематикою статті. Наведено узагальнений перелік засобів вимірювальної техніки (від найпростіших до сучасних), які використовуються в процесі вимірювання лінійних розмірів та кутів на площині. Визначено фактори, що впливають на швидкість вимірювання деталей під час застосування відеовимірювальних систем. Розглянуто особливості відеовимірювальних систем окремих виробників. Проведено оцінку зручності вимірювання базових показників механічних деталей. Запропоновано мінімальні вимоги щодо технічних показників та програмного забезпечення відеовимірювальної системи з точки зору значень їх характеристик за точністю вимірювань та співвідношення «ціна-якість».

Visual and measuring control is one of the most effective ways to detect defects in the manufacture of high-precision parts related to the measure of non-destructive testing of products.

Arguments on the need for systematic control during the manufacture of various parts are presented. An analysis of recent research and publications on the subject of the article. The generalized list of means of measuring equipment (from the simplest to modern) which are used at measurement of the linear sizes and angles on the plane is resulted. The factors influencing the speed of measurement

of details at application of video measuring systems are defined. The estimation of convenience of measurement of basic indicators of mechanical details is carried out. Some features of video measuring systems of separate manufacturers Mitutoyo of the Quick Image series (Japan), Aberlink (Great Britain) and YF-2010T Dongguan Yihui Optoelectronics Technology Co., Ltd. are considered (China).

The minimum requirements for technical indicators and specialized software of the video measuring system in terms of the values of their characteristics in terms of measurement accuracy are proposed (Basic requirements for the video measuring system are given in Table 1). These requirements were determined by the optimal choice of modern measuring equipment by the criterion of «price / quality».

Based on the analysis of existing models of video measuring systems, it is possible to draw the following conclusions:

visual-optical method — one of the most important methods of non-destructive testing in industrial production, which is used by leading companies in the creation of video measuring systems;

the choice of the manufacturer and model of the video measuring system is made by the consumer depending on the tasks of measurement and resource provision;

for the implementation of multisensory metrology, the measuring program may include optical, laser and contact research;

specialized software of video measuring system allows to solve special tasks to improve the design and production of various parts.

Ключові слова: відеовимірювальна система, лінійний розмір, точність, різнопрофільні деталі, мікроскоп.

Keywords: video measuring system, linear size, precision, multi-profile parts, microscope.

Значний проміжок часу фахівцями Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України для контролю під час виготовлення різнопрофільних деталей використовувався мікроскоп вимірювальний ИМЦ, виготовлений в місті Красноярську в 1980 році, який на сьогодні повністю вичерпав свій ресурс та вийшов з ладу. Ремонт та відновлення працездатності зазначеного обладнання були недоцільні

з причини складності придбання складових комплектувальних елементів мікроскопа, виробництво яких давно припинено.

Разом із тим технологічні процеси виготовлення різнопрофільних деталей, до яких висуваються вимоги підвищеної точності оброблення, потребують систематичного вимірювання їх геометричних розмірів, що вимагає жорсткого проміжного та фінішного контролю в процесі їх виготовлення, а також

проведення монтажних операцій. Під час контролю необхідно оцінити геометричні параметри, дотримання форми, можливі відхилення та розміщення поверхонь елементів деталей.

При цьому потрібно враховувати, які результати вимірювань геометричних величин, зокрема лінійних розмірів мініатюрних деталей та кутів на площині, є достовірними за умови оцінки їх параметрів точності.

Обсяги комплексного аналізування та ґрунтовного опрацювання результатів точності вимірювань залежать від різновидів вимірювань, отриманої кількості експериментальних даних та можливого порядку їх отримання, граничних вимог щодо точності вимірювань тощо. Тобто, для забезпечення окресленої вимірювальної задачі постає питання найбільш оптимального вибору сучасного засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) за критерієм «ціна/якість». Аналіз ЗВТ, які використовуються під час вимірювання лінійних розмірів та кутів на площині, та розгляд особливостей відеовимірювальних систем окремих виробників дозволить запропонувати, на думку авторів, найоптимальніший варіант такої системи.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Наявні публікації щодо задач практичного застосування та можливого створення відеовимірювальних систем (а також їх складових частин) у своїй більшості мають інформаційно-рекламний характер [1, 2]. Хоча певна кількість, в основному, вітчизняних дослідників присвятили свої праці зазначеному питанню. Можливо назвати такі публікації [3—5]. Вагомий внесок у розроблення методів та рекомендацій оптимального застосування відеовимірювальних систем мали дослідження, проведені зарубіжними фахівцями. Це, зокрема, праці [6—9]. Доступна також достатньо велика кількість публікацій рекламного характеру.

Опрацювавши значний масив інформації із джерел [3, 5—10], автори пропонують узагальнений перелік засобів вимірювальної техніки (від найпростіших до сучасних), які використовуються (або можуть використовуватися) в процесі вимірювання лінійних розмірів та кутів на площині:

- 1) штангенінструмент;
- 2) мікрометричні інструменти;
- 3) калібри;
- 4) індикатори годинникового типу;
- 5) призматичні кутові прилади, конусні калібри, шаблони;
- 6) тангенсні та синусні лінійки;

- 7) рулетки вимірювальні;
- 8) лінійки розмічувальні;
- 9) кутоміри різних типів;
- 10) мікроскопи інструментальні;
- 11) мікроскопи універсальні вимірювальні;
- 12) стереомікроскопи різних типів;
- 13) відеовимірювальні машини;
- 14) відеовимірювальні комплекси;
- 15) 3D відеовимірювальні системи.

Автори зауважують, що прямі разові вимірювання, а саме такими є вимірювання лінійних розмірів та кутів на площині, на сьогодні можна вважати найбільш поширеними під час оцінки геометричних розмірів різнопрофільних деталей у процесі їх виготовлення, які виконують у разі стабільних показів засобів вимірювань за наведених похибок. За звичайних умов точність цих вимірювань може бути достатньо задовільною, а їх простота, висока швидкість (кількість вимірювань за одиницю часу) та низька вартість ставлять разові вимірювання поза конкуренцією порівняно з іншими видами вимірювань, що здійснюються вимірювальними приладами (пристроями) та вимірювальними системами.

Уважається, що візуально-вимірювальний контроль є одним із найбільш ефективних способів виявлення дефектів у процесі виготовлення деталей підвищеної точності. Адже, звичайно, із візуального огляду починаються всі заходи із неруйнівного контролю виробів. На сьогодні цей вид контролю проводиться із використанням спеціальних оптичних систем та дозволяє досліджувати різні комплектувальні вироби, незалежно від матеріалів, із яких вони виготовлені [7].

Контрольно-вимірювальна система (вимірювальна установка, відео- вимірювальна машина, 3D відеовимірювальна система) — це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних приладів і пристроїв та інших технічних засобів, призначених для досліджень властивостей зразків, метрологічної оцінки (півірки, калібрування тощо) інших засобів вимірювальної техніки. Об'єктом досліджень у такому разі є засоби вимірювальної техніки (прилади, канали систем, сенсори та міри). Конструктивно контрольно-вимірювальні системи виготовляють, переважно, як одне ціле, у виді стенда з необхідними пристроями під'єднання зразків для дослідження, регулювання величин відеозображення та документування результатів вимірювань.

Для вирішення задач геометричних вимірювань в технологічних процесах виготовлення площинних деталей підвищеної точності можуть використовуватися

такі засоби вимірювальної техніки від різних виробників:

1) засоби з 2D вимірюваннями (вимірювання за двома координатами):

- мікроскопи інструментальні типів ИМЦ 100х50 А, ИМЦ 150х50 Б, ИМЦЛ 100х50 А, ИМЦЛ 150х50 Б (усі виробництва СРСР), ММИ-Ц МІКРОТЕХ (виробництва України);

- мікроскопи універсальні вимірювальні типів УИМ-21, УИМ-23 (виробництва СРСР);

2) стереомікроскопи різних типів (виробництво зосереджено в декількох країнах Європи, Північної Америки та Південно-Східної Азії);

3) 3D відеовимірювальні машини (вимірювання за трьома координатами):

- комбінована координатно-вимірювальна машина *BATY SM20* (Велика Британія);

- машини вимірювальні типу ИЗМ (ИЗМ-1, ИЗМ-2, ИЗМ-3) (всі виробництва СРСР);

4) 3D вимірювальні системи (вимірювання за трьома координатами):

- * *ABERLINK PROJECT X* (Великобританія);

- * *YF-2010T Dongguan Yihui Optoelectronics Technology Co., Ltd.* (Китай);

- * *VISIO 902.2200 SYLVAC VISIO* (Швейцарія);

- * *LVC400 VISION Engineering Ltd* (Великобританія);

- * *Quick Vision, Quick Scope, Quick Image Mitutoyo Corporation* (Японія).

Практичний досвід авторів дає можливість стверджувати стосовно необхідності експлуатування засобів вимірювальної техніки, що мають певні високоякісні метрологічні характеристики.

Популярність таких вимірювань пояснюється також іншими причинами. Одна з них — можливість визначити стадію виробничого процесу, на якій з'являється дефект. У результаті виробник скорочує час та кошти, витрачені на виготовлення неякісної продукції, виявляє й проводить відбір браку та головне — зберігає свою репутацію. Зазвичай необхідно визначитися із вибором вимірювань: ручний режим чи автоматизоване вимірювання? У цьому питанні ключову роль відіграє відповідність між виробничими задачами та вибраними засобами контролю. Вибір у першу чергу залежить від таких факторів: розміру заготовки, застосовуваних матеріалів, швидкості досліджень, повторюваності, вимог до точності вимірювань та багатьох інших факторів. Однак, найчастіше під час вибору між ручними та автоматизованими системами вимірювань критичним фактором є пропускна властивість. Для невеликих обсягів продукції достатньо ручних вимірювань, тоді

як швидке дослідження великої кількості зразків потребує автоматизації.

Отже, у разі застосування в практичній діяльності 3D відеовимірювальної системи виробник отримує значний економічний ефект внаслідок скорочення часу вимірювання лінійних розмірів та площинних кутів контрольованих деталей. Одночасно з цим використовуються високоякісні функціональні можливості під час опрацювання відеозображень, що значно зменшують вірогідність помилки оператора.

3D вимірювальні системи надають економічний ефект, одночасно забезпечують значний перелік можливостей у процесі опрацювання зображень, наприклад:

1) запам'ятовування та збереження зображень у пам'яті з урахуванням 256-рівневої шкали яскравості;

2) урахування змін у відеозображенні залежно від порогових рівнів;

3) вимірювання розмірів деталей (заготовок) за допомогою алгоритму підрахунку числа пікселів;

4) визначення граничних розмірів деталі з високою точністю (роздільна здатність досягає близько 1 пікселя);

5) вимірювання зображень великогабаритних деталей за частинами;

6) застосування комбінованих координат точок;

7) забезпечення високої точності фокусування під час вимірювання висоти та оптимальний підбір контрасту зображення.

Для контролю в процесі виготовлення механічних деталей підвищеної точності автори визначили базові вимоги до технічних показників, з урахуванням рекомендацій [8], та програмного забезпечення відеовимірювальної системи, які наведено в таблиці 1.

Надамо короткі описи найбільш конструктивно оптимальних моделей відеовимірювальних систем.

Фірма Aberlink (Великобританія) запропонує цікаве рішення щодо скорочення часу вимірювання: продумана конструкція магнітного кінематичного з'єднання дозволяє замінювати вимірювальну головку на камері за декілька секунд. Це означає, що деталі можуть контролюватися за допомогою контактного датчика та відеосистеми на одному робочому місці в єдиній програмі контролю, що збільшує достовірність результатів вимірювання. Важливою складовою відеовимірювальної системи є пряме та зворотне освітлення для контролю профілів та поверхонь деталей.

Разом із тим за виграшу у швидкості вимірювання лінійних розмірів деталей, звівши до мінімуму

Таблиця 1. Базові вимоги до відеовимірювальної системи

Table 1. Basic requirements for video measuring system

№	Назва показника, функціональна можливість	Значення показника
Технічні показники		
	Переміщення (вимірювання)	200 mm x 100 mm x 150 mm
	Похибка під час вимірювання довжини в площині X, Y	$\leq \pm 3 + L/200 \mu m$, де L довжина mm
	Зум-об'єктив (збільшення)	0,7 ~ 4.5X
	Загальне збільшення (компенсація)	30-190X
	Похибка під час оцінки перпендикулярності (3D)	$X \perp Y \leq 5 \mu m$, $Z \perp X \leq 0.02 mm$, $Z \perp Y \leq 0.02 mm$
	Похибка за збільшення масштабу	X, Y reading error $\leq 0.005 mm$
	Додаткове освітлення	Наявне
	Можливість калібрування системи	Скляний еталон у комплекті для калібрування до 200 мм
	Зонд для 3D вимірювань	Оригінальний зонд RENISHAW (Великобританія)
	Фіксування зон вимірювання	Наявність лазерного показника
Програмне забезпечення		
	2D вимірювання	Вимірювання висоти, ширини, довжини обох сторін кута, кута конуса, діаметра циліндра, фасок, прямолінійності, кола, циліндричності, перпендикулярності, паралельності тощо
	3D вимірювання за допомогою зонда	Вимірювання глибини отвору, діаметра кулі, циліндричності тощо
	Встановлення максимальних та мінімальних обмежень вимірювання	Попередження щодо виходу фактичних розмірів за межі встановленого діапазону
	Виведення зображення	Збереження результатів вимірювань або спостережень у форматах BMP, Jpg тощо
	Функції векторного моделювання	Підтримка векторного моделювання
	Створення карти вимірювання	Вимірювання безпосередньо на кресленику (рисунок), формування операційної карти
	Функції автоматичного вимірювання	Автоматичний пошук прямої лінії, багатозонний пошук прямої лінії тощо
	Звітування	Перетворення результатів вимірювань безпосередньо у формат в EXCEL, WORD, CAD

суб'єктивний вплив оператора на результати та збільшивши точність вимірювань, ми втрачаємо один важливий показник, притаманний оптичним системам — розмір поля огляду, тобто ділянки зображення, яку можна спостерігати через оптичну систему.

Для оптичних проекторів цей показник визначається збільшенням об'єктива та складає діаметр близько 30 мм (для 10-кратного об'єктива) або діаметр 60 мм (для 5-кратного об'єктива). Для оптичних мікроскопів розмір поля огляду залежить як від збільшення об'єктива, так і від окуляра, який використовується. Найбільше значення досягається за використання 1-кратного об'єктива та складає діаметр 24 мм або 30 мм залежно від окуляра.

Цифрові засоби візуалізації, як правило, мають прямокутний форм-фактор та у випадку використан-

ня 1/2» матриці дозволяють отримати поле огляду в 4 рази менше від зазначених вище: 6,4 мм x 4,8 мм. Це значно ускладнює пошук та ідентифікацію параметрів вимірювання деталей із різнопрофільною структурою та великою кількістю елементів, значна частина яких неухильно кількісно зростає за мірою вдосконалення виробів та вузлів, що випускаються.

Іншим фактором, що впливає на зручність вимірювань, є глибина різкості зображення, що формує оптична система, тобто відстань уздовж оптичної вісі. У сучасних оптичних мікроскопах глибина різкості зображення складає до $\pm 0,45$ мм. Отже, якщо потрібно вимірювати елементи деталі, які розміщені на різній висоті вздовж оптичної осі, й цей перепад перевищує 1 мм, то потрібно знову сфокусувати оптичну систему для формування чіткого зображення обох елементів для проведення надійних вимірювань.

Тобто, для вимірювання вздовж оптичної осі деталей зі складною топологією та з великою кількістю елементів, застосування класичних оптичних засобів вимірювання, навіть з цифровою візуалізацією, не завжди зручно та практично. Функція автоматичного фокусування стає додатковим бонусним критерієм, але впливає на загальну ціну устаткування.

У сучасних 3D вимірювальних системах типу Mitutoyo серії Quick Image (Японія) внаслідок подвійної телецентричної оптичної системи розмір поля огляду може досягати до 32 мм x 24 мм, глибина різкості до 11 мм, що перевищує аналогічні показники класичних оптичних мікроскопів з цифровою візуалізацією в 5 та 11 разів відповідно. При цьому забезпечується висока точність вимірювання від $\pm 3,5$ мкм за вимірювання у всьому діапазоні переміщення, який може бути 400 мм x 200 мм. Окрім того, в моделях QS-L AFB наявне автоматичне фокусування.

Отже, за сукупними значеннями показників 3D вимірювальні системи є аналогом оптичних проекторів, разом із тим більш продуктивні, надійні та точні.

Окрім того, важливим показником зручності та комфорту використання відеовимірювальних систем є спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє працювати у спрощеному режимі вимірювання з інтелектуальним режимом підказок так, щоби навіть недосвідчений користувач міг здійснювати прості виміри без звертання до настанов з користування програмним забезпеченням. Режим вимірювання за одного натискання кнопки «миші» дозволяє розпізнавати деталі в полі огляду, вирівнювати системи координат і здійснювати вимірювання бажаних розмірів із внесенням отриманих результатів на екран та використанням кольорової оцінки допусків.

Приклад зображення вікна інтерфейсу відеовимірювальної системи YF-2010T виробництва компанії Dongguan Yihui Optoelectronics Technology Co., Ltd. (Китай) наведено на рисунку 1.

Окремо потрібно визначити вимоги до жорсткості конструкції, яку зазвичай створюють на гранітній основі для забезпечення високої стабільності вимірювань. Тобто забезпечення можливості, наприклад, збільшення переміщення об'єкта вимірювання в площині із 100 мм x 100 мм до 200 мм x 170 мм збільшує загальну вагу конструкції відеосистеми в 2 рази — з 70 кг до 140 кг.

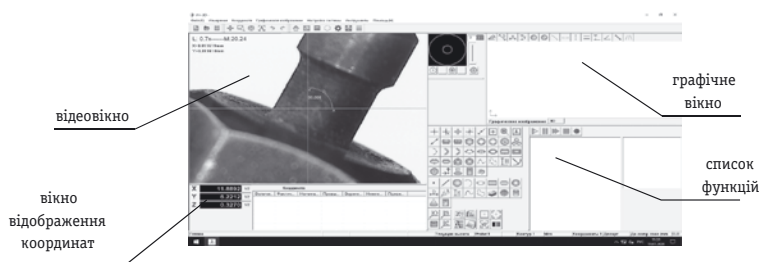


Рис. 1. Вікно інтерфейсу

Fig. 1. Interface window

Вибір виробника та моделі відеовимірювальної системи здійснюється замовником залежно від завдань вимірювання та ресурсного забезпечення замовника, для чого він оцінює в першу чергу похибку результату вимірювання (визначається технічними показниками) та функціональні можливості програмного забезпечення (ПЗ).

За результатами аналізу технічних показників зазначених оптичних систем за встановленими критеріями автори визначили найоптимальнішою за співвідношенням «ціна-якість» 3D відеовимірювальну систему YF-2010T виробництва компанії Dongguan Yihui Optoelectronics Technology Co., Ltd. (Китай), яка призначена для точного (похибка не гірше ± 4 мкм за довжини деталей до 200 мм) вимірювання геометричних розмірів продукції.

Відеовимірювальна система YF-2010T (рис. 2) виконує функції вимірювального мікроскопа за 2D вимірювань дуг, кіл, овалів, зовнішніх та внутрішніх лінійних, кутових розмірів у прямокутних та полярних координатах, різьб, шаблонів, лекал, конусів, пазів, відстаней між центрами отворів тощо, окрім того, за використання зонда із комплекту системи дозволяє вимірювати глибину (3D вимірювання) деталей із закритими отворами, здійснювати комбіновані вимірювання циліндрів, конусів тощо.

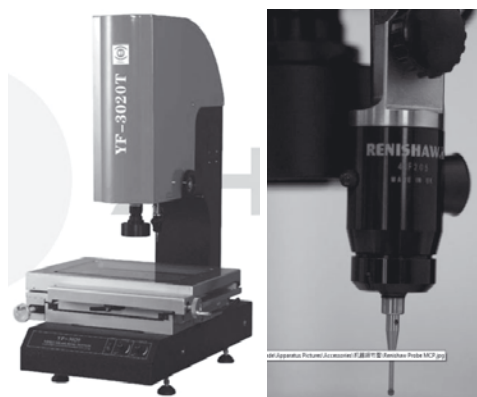


Рис. 2. Зовнішній вид відеовимірювальної системи YF-2010T.

Figure 2. Appearance of the video measuring system YF-2010T.

Приклади застосування базових функцій ПЗ за послідовного вимірювання лінійних розмірів від базової точки та діаметра на відеозображенні наведено на рис. 3.

Приклади застосування панелі інструментів під час вимірювань розміру лінії між двома заданими точками та діаметра за трьома точками наведено на рис. 4.

Метод вимірювань за окремими точками доцільно застосовувати у разі, коли за найменшого значення кратності зум-об'єктива розмір об'єкта вимірювання більший, ніж поле огляду. Тобто точки фіксуються шляхом переміщення об'єкта вимірювання за допомогою регуляторів переміщення стола.

Функції, що дозволяють спростити процес проведення вимірювання складних механічних деталей — це вимірювання дуги, радіуса, кута, паза тощо.

Окремо потрібно приділити увагу до спрощення вимірювання висоти або глибини отворів (режим 3D-вимірювання). Вимірювання проводять у 4-х точках із застосуванням контактної датчика, що дозволяє одночасно оцінити показники плоскопаралельності складної механічної деталі.

Відеовимірювальна система YF-2010T адаптована для використання контактних систем (датчиків) Renishaw TP-20 та Renishaw TP-200, що дозволяє виконувати і контактні-досліджувані вимірювання. Тобто, визначають координати поверхні та границі (граничні розміри) у складних 3D-моделях, де оптичне розпізнавання неможливе.

Якщо доцільно, то використовується оптичний контроль [6], оскільки це більш швидкий процес. Але, якщо деталі мають неправильну форму або вони не є достатньо очищеними від бруду, то робота з контактною вимірювальною головкою — найкращий варіант. Застосовуються контактні вимірювальні головки Renishaw TP-20 або Renishaw TP-200 для відбору даних стосовно координат для тривимірних вимірювань.

Програма вимірювань може включати оптичне, лазерне та контактне дослідження для реалізації мультисенсорної метрології в загальній площині координат [6].

Спеціалізоване ПЗ відеовимірювальної системи також дозволяє, наприклад, створювати карти вимірювань та зберігати результати вимірювань:

1) у форматі *Exel*, *Word*, а також *SPC* для статистичного опрацювання інформації з метою покращення якості виготовлення деталей;

2) у графічному форматі *Jpg*, *BMP* для візуального аналізу та визначення причин виникнення дефектів механічних деталей під час експлуатації. Окрім того, за допомогою спеціалізованого ПЗ можливо створення графічних шаблонів (макросів) для деталей, що збільшує ефективність вимірювань.

Відеовимірювальна система дозволяє здійснити зворотне проектування (*Reverse Engineering*) попередніх версій деталей, для яких уже втрачені кресленики, а *CAD*-моделі недоступні.

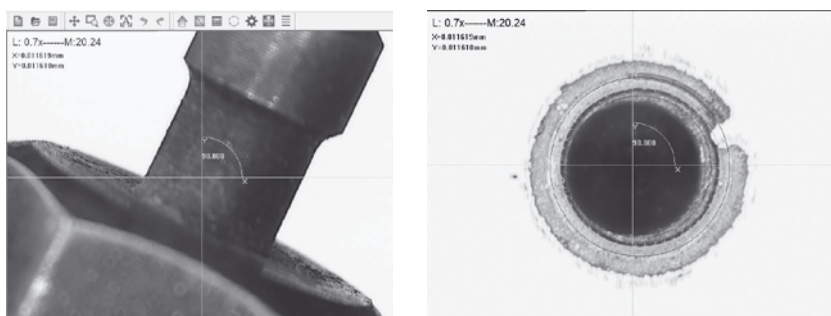


Рис. 3. Вимірювання із застосуванням базових функцій
Fig. 3. Measurements using basic functions



Рис. 4. Застосування панелі інструментів інтерфейсу для виконання вимірювань

Fig. 4. Use the interface toolbar to perform measurements

ВИСНОВКИ

За результатом аналізу наявних моделей відеовимірювальних систем можливо зробити такі висновки:

► візуально-оптичний метод — один із найважливіших методів неруйнівного контролю в промисловому виробництві, який застосовується провідними компаніями в процесі створення відеовимірювальних систем;

► вибір виробника та моделі відеовимірювальної системи здійснюється споживачем залежно від завдань вимірювання та ресурсного забезпечення;

► для реалізації мультисенсорної метрології програма

вимірювань може включати оптичне, лазерне та контактне дослідження;

► спеціалізоване ПЗ відеовимірювальної системи дозволяє вирішувати спеціальні завдання щодо покращення проектування та виробництва різнопрофільних деталей.

Отже, практичний досвід авторів надає можливість запропонувати для використання у разі невеликих обсягів виробництва оптимальну за співвідношенням «ціна-якість» 3D відеовимірювальну систему YF-2010T створену компанією *Dongguan Yihui Optoelectronics Technology Co., Ltd.* (Китай).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Прайс — галерея № 53 UA-2019. MIKROTEX пропонує в Україні найкращий світовий вимірювач. Електронний каталог ПНВП «MIKROTEX» (Price-gallery № 53 UA-2019. MIKROTEX in Ukraine offers the best in the world measuring device. E-catalogue PN VP MIKROTEX), 300 с/р. Режим доступу www.microtech-ua.com.
2. ABERLINK Innovative Metrology. Електронний каталог продукції (ABERLINK Innovative Metrology. E-catalogue), 11 с/р. Режим доступу www.microtech-ua.com.
3. Подчашинський Ю.О. Методи і засоби відеовимірювань лінійних і кутових переміщень. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.11.01-Прилади та методи вимірювання механічних величин. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ (Podchaschynskiy Y. O. Methods video probing of linear and angle premises. Abstract of a thesis for obtaining degree of candidate of technical sciences. Speciality 05.11.01 — Devices and methods of measurement of mechanical dimensions. National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv) — 2002, 27 с/р.
4. Мельничук С.В., Подчашинський Ю.О., Лугових О.О., Вітюк І.В., Повар О.С. Програмно-апаратний комплекс для визначення параметрів переміщень і оцінки плавності ходу підвіски на основі чотириланкового важільного механізму. Вісник ЖДТУ (Melnychuk S.V., Podchaschynskiy Y.O., Lughovych O.O., Vityuk I.V., Povar O.S. Firmware complex for characterization of premises and estimation of suspension movement on the basis of four-stage lever mechanism. Herald of GDTU) № 2(53), 2010, с/р. 96—104.
5. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. / Д.М. Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. — Мелітопіль: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс». Таврійський державний агротехнологічний університет (Nesterchuk D.M., Kvitka S.O., Ghalko S.V. Textbook: Basics of metrology and instrumentation. — Melitopol. Publishing house «Lux». Tavria State Agrotechnological University), 2017. — 256 с/р.
6. Мелехова Нина, Ивахин Андрей «Видеоизмерительные системы iNEXIV VMA-4540 — эталон качества метрологической инспекции» Журнал «Современная электроника» (Melekhova N., Ivakin A. Video Measuring Systems iNEXIV VMA-4540 — quality standards of metrological inspection. Journal «Modern electronics»), — 2015, № 8, с/р. 26—28.
7. Мамонтова Нина «Мультисенсорная метрология: новый подход к измерениям». Сборник «Производство электроники: технологии, оборудование, материалы» (Mamontova N. Multisensory metrology: new measurement approach. Collected articles. Electronic Engineering production: technologies, equipment, materials), — 2012, № 4, с/р. 1—4.
8. Ключев В.В. (Ред.) Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Машиностроение (Klyev V.V. Nondestructive testing and diagnostics. Manual. 2-nd revised and edited. Moscow: Mechanical engineering), 2003. — 656 с/р.
9. Ключев В.В. (Ред.) Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах, Том 1. — В 2 кн. — Книга 1. Визуальный и измерительный контроль (Klyev V.V. Nondestructive testing. Manual in 7 volumes. Vol. 1-2 books. Book 1. Visual and measuring control). 2008. — 323 с/р.
10. ДСТУ OIML D 11:2012 Метрологія. Засоби вимірювання електронні. Загальні технічні вимоги (DSTU OIML D 11:2012. Metrology. Electronic instrumentation. Common technical requirements). 

Отримано / received: 20.02.2021.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Н.М. Зашчепкіною,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського.
Prof. N.M. Zashchepkina, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.37-41

УДК 681.787.2

ПІДВИЩЕННЯ СЕЛЕКТИВНОСТІ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ ГАЗОВОГО АНАЛІЗУ

Increasing the Selectivity of Interferometric Gas Analysis Devices

В. Р. Козубовський, доктор технічних наук,
професор кафедри програмного забезпечення систем,
e-mail: kozubvr@gmail.com

Ю. Ю. Білак, кандидат фізико-математичних наук,
завідувач кафедри,
e-mail: yubill76@gmail.com

Ужгородський національний університет, Україна

V. P. Kozubovskyy, doctor of technical sciences,
professor of the department of systems software,
e-mail: kozubvr@gmail.com

Yu. Yu. Bilak, candidate of physical and mathematical
sciences, docent of the department,
e-mail: yubill76@gmail.com

Uzhgorod National University, Ukraine

Представлено аналіз можливості покращення селективності й точності інтерферометричних (рефрактометричних) приладів. Прилади, що використовують для визначення показника заломлення, називають рефрактометрами. Визначення найчастіше проводять за температури 20°C і довжини хвилі D лінії спектра атома натрію ($\lambda = 589,3$ нм). За цих умов вважається, що показник заломлення є фізичною константою. Показники заломлення для різних речовин табульовані, й їх значення використовують за різних вимірів і розрахунків. У газовому аналізі рефрактометрію (інтерферометрію) використовують для виміру концентрації газового компонента. Найчастіше використовують інтерферометр Жамена, причому опорну кювету заповнюють еталонним газом, а через робочу кювету пропускають аналізований газ (точніше суміш аналізованого газу й еталонного) і визначають концентрацію аналізованого газу в цій суміші. Вимірюють відношення інтенсивності світла, яка проходить через робочу кювету до інтенсивності світлового потоку в опорній кюветі. Оскільки показники заломлення газових компонентів відомі з великою точністю, то результати вимірів є достовірними. Однак цей метод аналізу не є селективним, і наперед треба знати, які гази ми вимірюємо. Для підвищення селективності аналізу авторами пропонується проводити виміри в області аномальної дисперсії аналізованого газового компонента. Для підвищення точності вимірів пропонується перейти від визначення відношення інтенсивності світлових потоків до виміру частотних зсувів. Все це відкриває нові можливості для інтерферометричних методів газового аналізу.

The article is devoted to the analysis of the possibility of improving the selectivity and accuracy of interferometric (refractometric) devices. Devices used to determine the refractive index are called refractometers. The determination is most often performed at a temperature of 20°C and the wavelength D of the line of the sodium atom spectrum ($\lambda = 589.3$ nm). Under these conditions, it is considered that the refractive index is a physical constant. Refractive indices for different substances are tabulated and their values are used in different measurements and calculations. In gas analysis, refractometry (interferometry) is used to measure the concentration of the gas component. The Jamin interferometer is most often used, and the reference cell is filled with the reference gas, and the analyzed gas (more precisely, a mixture of the analyzed gas and the reference gas) is passed through the working cell and the concentration of the analyzed gas in this mixture is determined. Measure the ratio of the intensity of light passing through the working cell to the intensity of the luminous flux in the support cell. Since the refractive indices of gas components are known with great accuracy, the measurement results are reliable. However, this method of analysis is not selective and you need to know in advance what gases we measure. To increase the selectivity of the analysis, the authors propose to make measurements in the area of the anomalous dispersion of the analyzed gas component. To increase the accuracy of measurements, it is proposed to move from determining the ratio of light flux intensity to the measurement of frequency shifts. All this opens new opportunities for interferometric methods of gas analysis.



В. Р. Козубовський



Ю. Ю. Білак

Ключові слова: аномальна дисперсія; кільцевий газовий лазер; газоаналізатор; абсорбційна спектроскопія; інтерферометр.

Keywords: interferometer; anomalous dispersion; ring gas laser; gas analyzer; absorption spectroscopy.

У традиційній рефрактометрії (інтерферометрії) вимірюється величина відношення світлових потоків в аналізованій пробі $\Delta\Phi$ до початкового Φ_0 , що надходить в кювету порівняння з еталонним газом. Як правило, точність вимірювання величини $\Delta\Phi/\Phi_0$ в звичайних фотометрах не перевищує 10^{-3} (коефіцієнти заломлення газів відрізняються несуттєво). Невелика точність виміру фотометричних параметрів аналітичних приладів. Разом із тим коефіцієнти поглинання аналізованих газів в інфрачервоній області спектра є індивідуальними для кожного газу і достатньо значними. Тому цікавим є варіант проведення інтерферометричних вимірів в області аномальної дисперсії газових компонентів. У цьому випадку поєднуються переваги інтерферометричних і абсорбційних методів. Успіхи в сфері вимірювань за допомогою інтерферометричних (фазових) методів дуже суттєві [1]. У зв'язку з цим перспективним є перехід від виміру фотометричних величин до вимірів фазового зсуву та частоти випромінювання за його поглинання аналізованою речовиною.

Як відомо, коефіцієнт поглинання є уявною частиною комплексного показника заломлення: $n' = n - ik$, де n — дійсна частина показника заломлення, яка для газів близька до одиниці поза смугами поглинання; k — уявна частина показника заломлення, що відповідає за згасання електромагнітної хвилі: $k = K\lambda_0/4$, де K — коефіцієнт поглинання.

Поблизу лінії поглинання, з частотою ω_0 і з однорідною шириною γ , k і n можна записати у виді [2]

$$k = (Ne^2/8m\epsilon_0)\gamma/[(\omega_0 - \omega)^2 + (\gamma/2)^2], \quad (1)$$

$n = 1 + (Ne^2/4m\epsilon_0)(\omega_0 - \omega)/[(\omega_0 - \omega)^2 + (\gamma/2)^2]$, де e — величина електричного заряду осцилятора; N — кількість осциляторів в одиниці об'єму; ϵ_0 — електрична постійна; m — маса осцилятора.

У випадку лінії з доплерівським розширенням вираз (1) матиме більш складний вид [3].

Як видно, вирази для k і n дуже схожі, до них входять ті ж самі змінні та константи. Суттєві зміни з k і n відбуваються поблизу лінії поглинання ($\omega \rightarrow \omega_0$). Характер цих змін відрізняється. Залежність $k(\omega)$ відтворює контур лінії поглинання, $n(\omega)$ має дисперсійний характер і є першою похідною від контуру лінії поглинання.

Як відомо, зв'язок величин k і n дозволяє відтворити за допомогою перетворення Фур'є спектр поглинання аналізованого газу за інтерферограмою, отриману за сканування оптичної довжини одного із плечей двопробного інтерферометра [4, 5].

Вибір певного методу аналізу газових компонентів залежить від величин n , k в тій чи іншій спектральній області, а також від відмінності цих величин для аналізованого газу і заважаючих компонентів. Якщо світловий потік інтенсивністю I проходить

через кювету довжиною L , розміщену в інтерферометрі і заповнену газом з концентрацією X , показник поглинання якого дорівнює K , а показник заломлення n відрізняється від показника заломлення повітря на величину Δn , то зміна світлового потоку ΔI , що надходить на фотоприймач, який установлено за інтерферометром, у першому наближенні матиме вид [6]:

$$\Delta I/I = (XKL + 2\pi L\Delta nX/\lambda). \quad (2)$$

Отже, вираз (2) дозволяє зробити вибір між фазовими методами і прямим вимірюванням поглинання. Щоби фазові методи мали можливість конкурувати з простим вимірюванням поглинання, зсув фази має перевищувати зміну оптичної щільності. У видимій області спектра, найбільш зручній для оптичних вимірювань, коефіцієнт поглинання основних газових компонентів, що забруднюють атмосферне повітря, дорівнює практично нулю, тому в цьому випадку використовують інтерферометричні прилади газового аналізу.

Однак можуть бути створені прилади, що об'єднують переваги фазових і абсорбційних методів аналізу. Розглянемо деякі конкретні приклади.

1. Як відомо, традиційні інтерферометричні методи аналізу не мають селективності, хіба що показник заломлення аналізованої речовини у багато разів вищий, ніж у заважаючих компонентів. Однак селективність аналізу може бути досягнута за роботи в області аномальної дисперсії аналізованої речовини [7]. Дійсно, залежність показника заломлення

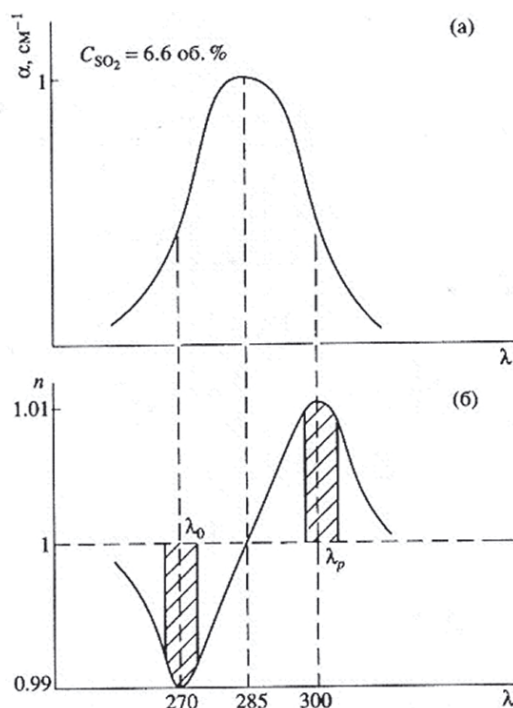


Рис. 1. Залежність коефіцієнта поглинання α (а) і показника заломлення n (б) від довжини хвилі в області полоси поглинання SO_2 (спрощений вид)
Fig. 1. Dependence of the absorption coefficient α (a) and the refractive index n (b) on the wavelength in the region of the absorption band SO_2 (simplified view)

від частоти поблизу центра лінії поглинання ω_0 має вид (1):

$$N = 1 + k\mu/(\mu^2 + \gamma^2/4), \quad (3)$$

де k — постійна, що залежить від параметрів аналізованої речовини; $\mu = (\omega - \omega_0)$ — відхилення частоти від центра лінії поглинання.

Отже, показник заломлення є непарною функцією розстроєння і має дисперсійний характер (рис. 1). Якщо виділити максимум і мінімум цієї кривої, то показник заломлення в цих точках може відрізнитися достатньо значно (на (10—20) % у випадку сильних ліній поглинання). Тому зміщення інтерференційних смуг робочої картини, якщо як наповнення кювети порівняння вибрали чисте повітря, буде пропорційне різниці ходу: $\Delta p = L(n_{\max} - n_p)X = k\lambda_p$, де λ_p , $n_{\max}$ — довжина хвилі та показник заломлення у максимумі дисперсійної кривої; L — довжина робочої камери інтерферометра; n_p — показник заломлення повітря, $k = 1, 2, 3 \dots$. Зміщення опорної інтерференційної картини буде пропорційне $\Delta p = L(n_p - n_{\min})X = k\lambda_0$, де λ_0 , $n_{\min}$ — довжина хвилі та показник заломлення у мінімумі дисперсійної кривої.

Розглянемо конкретний приклад. Припустимо проводимо аналіз SO_2 в області 285 нм. Коефіцієнт поглинання $K \sim 40 \text{ см}^{-1}\text{атм}$. Довжини хвиль $\lambda_p = 300 \text{ нм}$, $\lambda_0 = 270 \text{ нм}$. Для виділення цих довжин хвиль використовують інтерференційні світлофільтри з шириною 10 нм. Показник заломлення на $\lambda_p - n_{\max} = 1,1$; на довжині хвилі $\lambda_0 - n_{\min} = 0,9$. Тоді для зміщення інтерференційної картини на 0,5 смуги за $L = 10 \text{ мм}$ необхідна концентрація SO_2 $X = 39 \times 10^{-6}$. Вихідна інтерференційна картина зміщується на 0,5 напівсмуги в протилежну сторону за концентрації SO_2 $X = 33 \times 10^{-6}$. Тому за довжини кювети 10 мм діапазон вимірювань SO_2 дорівнюватиме (0—25) ppm (для виключення переходу на другу напівсмугу). Представимо, що в газовій суміші присутня заважаюча компонента, наприклад, CO_2 з концентрацією, що у 100 разів перевищує діапазон вимірів. Тоді додаткова різниця ходу, зумовлена присутністю 0,25 % об. CO_2 , $\Delta = 8 \times 10^{-6}$. Така різниця ходу відповідає концентрації SO_2 4×10^{-6} . Однак зміщення робочої й опорної картини відбувається в одну і ту ж сторону, тобто різниця зміщення дорівнюватиме нулю. Отже спосіб гарантує селективність аналізу $S_B/S_M \sim 10^5$, де S_B — чутливість до вимірюваного компонента, S_M — до заважаючого, і, крім того, значно підвищує чутливість (на 2-3 порядки). Тому прилади, що базуються на цьому методі, можуть застосовуватися для аналізу мікроконцентрацій досліджуваного газу в багатокомпонентній газовій суміші.

На рис. 2 наведено можливе схемне рішення аналогічного аналізатора [8]. Випромінювання від лампи 1 колімується лінзою 2 і направляється на діафрагму 3, що виділяє нижню і верхню частини світлового потоку. Далі верхня частина світлового пото-

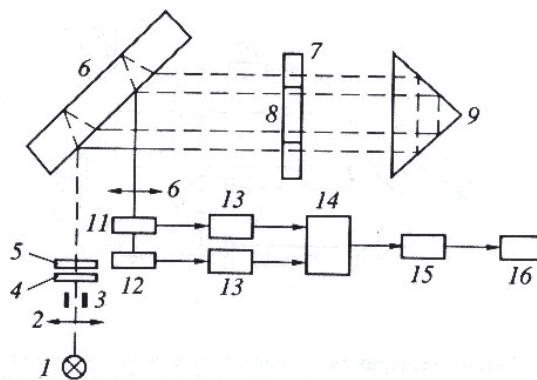


Рис.2. Селективний аналізатор на основі інтерферометра Жамена

Fig.2. Selective analyzer based on Jamen interferometer

ку пропускається через світлофільтр 4 робочого каналу, максимум пропускання якого відповідає максимуму дисперсійної кривої (рис. 1), а нижня частина світлового потоку — через розміщений під ним світлофільтр 5 опорного каналу, максимум пропускання якого відповідає мінімуму дисперсійної кривої. Кожна частина світлового потоку, що відповідає двом довжинам хвиль, ділиться на світлоподільній пластині 6 на два промені. Один із променів кожної довжини хвилі проходить через кювету 7, яка містить еталонну речовину (наприклад, розчинник), і через кювету 8, що містить аналізовану речовину. Далі промені відбиваються від призми 9 і знову проходять через ті ж самі кювети. Внаслідок різниці показників заломлення розчинника й аналізованої речовини на двох довжинах хвиль між ними виникає різниця ходу.

На світлоподільній пластині 6 промені змішуються і виникають дві інтерференційні картини з променів, що пройшли відповідні світлофільтри. Ясно, що зміщення полос цих інтерферируючих променів відносно відповідних фотоприймачів 11 і 12 матиме різний знак, скажімо смуги робочої картини змістяться праворуч, полоси опорної — ліворуч. Ці інтерференційні картини проектуються за допомогою об'єктива 10 на відповідні позиційно-чутливі фотоприймачі 11 і 12 (мікросхема типу К849ПП1) так, щоб ширина інтерференційних максимумів або мінімумів була того ж порядку, що й розміри світлочутливих площадок фотоприймачів. Тоді за зміщення смуг інтерференційної картини з фотоприймачів 11 і 12 знімається електричний сигнал різної полярності (зміщення відбувається у різні сторони), які підсилюються в підсилювачі 13 і надходять на суматор 14 і далі в систему реєстрації 15, яка виконує математичні операції за відповідною програмою з цим сумарним сигналом. Результат опрацювання сигналу надходить на цифровий індикатор 16, де він представляється в одиницях концентрації аналізованого компонента.

Експериментально проводилися виміри концентрацій парів Hg на переході $6^3P_2 - 7^3S_1$ з довжиною хвилі 546,1 нм [9]. Була досягнута чутливість 0,08 мг/м³.

2. Використання фазових методів у спектроскопії нелінійного поглинання розглянемо на прикладі кільцевого газового лазера (КГЛ). У цьому типі лазера зустрічні хвилі, що належать одній і тій же моді, є незалежними і просторово розділені. Із цієї причини їх інтерференцію можна спостерігати у зовнішньому інтерферометрі. Інтерференційна картина складається з череди світлих і темних смуг — інтерференційних максимумів і мінімумів. Якщо частоти зустрічних хвиль збігаються — інтерференційна картина нерухома відносно фотоприймача, якщо частоти різні — вона починає «бігти» ліворуч або праворуч залежно від знаку різниці їх частот $f_{1,2}$. У результаті проходження по чутливому шару фотоприймача темних та світлих смуг з нього знімається сигнал биття.

У такий спосіб були стабілізовані два КГЛ по центру лінії підсилення і поглинання. Значення короточасової стабільності частоти складало $2,6 \times 10^{-11}$ і 5×10^{-12} за 1 с відповідно за стабілізації по центру лінії підсилення і поглинання. Значення довготермінової стабільності за 1 год дорівнювали 10^{-8} і 3×10^{-11} для цих двох випадків [10].

Як видно, використання залежності різниці фаз зустрічних хвиль від підстроювання для стабілізації частоти генерації КГЛ дає можливість отримати добре значення короточасової стабільності частоти без особливих складнощів, що потрібно для вирішення ряду прикладних задач, у тому числі й створення аналітичних приладів.

Розглянемо тепер, як можна використати стабілізований по фазовому резонансу КГЛ для концентраційних вимірювань. У КГЛ дуже суттєвим є зсув частоти, пов'язаний зі зміною модуля і фази коефіцієнтів зв'язку зустрічних хвиль. Так, відповідно до роботи [9], зсув частоти КГЛ

$$\Delta\Omega = (2\Gamma m_1/m_2)(I_2(0)/I)\sin(\vartheta_1 - \vartheta_2), \quad (7)$$

де Γ — ширина резонансу, $I_2(0)$ — інтенсивність слабкої хвилі в центрі резонансу у разі збігу центральних частот резонансів пасивного й активного середовищ, $I = I_1 + I_2$ — сумарна інтенсивність зустрічних хвиль, $m_{1,2}$ — модулі коефіцієнтів зв'язку, які дорівнюють: $m_{1,2} = 2c/L(1-R)\sqrt{R_{1,2}}$, де R — коефіцієнт відбиття дзеркала, за яким встановлені додаткові дзеркала з коефіцієнтами відбиття R_1, R_2 , які повертають частину випромінювання у резонатор; ϑ_1, ϑ_2 — фази відбитих сильної та слабкої хвиль. При цьому інтенсивність фазових резонансів за вимірювання різниці фаз $\Theta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ задається виразом [10]: $I_2 = I_2(0)(1 - k\sin\Theta)$, де k — коефіцієнт, який урахує наявність внутрішнього зв'язку зустрічних хвиль у резонаторі лазера (розсіювання

на дзеркалах, неоднорідності активного середовища і т.п.). Однак модулі коефіцієнтів $(m_{1,2})_{in} \ll (m_{1,2})_{out}$, і коефіцієнт k близький до одиниці.

Якщо КГЛ стабілізований по резонансам шириною 100 кГц, зовні резонатора встановлено одне дзеркало, що повертає і відбиває випромінювання сильної хвилі в резонатор лазера, тобто $(m_1)_{out} + (m_1)_{in} = m_1 \gg m_2 = (m_2)_{in}$, контраст резонансу $I_2(0)/I = 0,2$, різниця фаз $\Theta = 90^\circ$, тобто $\sin\Theta = 1$, отримаємо у відповідності з (7) $\Delta\Omega = 400$ кГц. За нестійкості частоти генерації ± 10 кГц (це зовсім реальне значення) похибка виміру цього значення зсуву складе $2,5 \times 10^{-5}$, що на два порядки краще, ніж за вимірів фотометричних величин (пропускання або відбивання).

Ураховуючи зазначене, авторами роботи запропоновано використовувати за вимірах концентрацій частотні зсуви стабілізованого по частоті кільцевого He-Ne лазера [11], що виникають внаслідок зменшення коефіцієнта відбивання R дзеркала, що повертає випромінювання, під час поглинання випромінювання в кюветі з аналізованим газом, встановленої перед цим дзеркалом, а також через зміну фази відбитого випромінювання внаслідок зміни його оптичного шляху в цій кюветі. Ідею метода пояснює рис. 3 [12]. Випромінювання КГЛ, що складається з He-Ne газорозрядної трубки 1, поглинаючої комірки 2, заповненої CH_4 за тиску 1 Тор, чотирьох дзеркал 3, одне з яких розміщено на п'єзокоректорі 4, надходить у зовнішній інтерферометр 5, де змішуються зустрічні хвилі I_1, I_2 . Биття цих хвиль реєструється за допомогою фотоприймача 6 з двома площадками типу ФУЛ-611. Система АПЧ 7 опрацьовує відхід частоти генерації лазера від центра лінії підсилення або поглинання. При цьому корегувальна напруга АПЧ подається на п'єзокоректор 4. У змішувачі 8, куди прямує випромінювання більш сильної хвилі, що виходить через різні дзеркала 3 КГЛ,

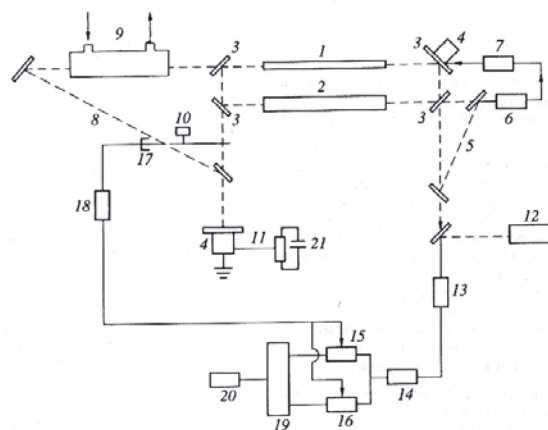


Рис.3. Аналізатор на основі стабілізованого по частоті кільцевого He-Ne лазера
Fig.3. Analyzer based on frequency-stabilized ring He-Ne laser

встановлена кювета 9, через яку прокачується аналізована газова суміш. Модулятор 10 по черговою перемикає випромінювання, що пройшло через кювету 9, і випромінювання направляється повз неї. Світловий потік, який вийшов зі змішувача 8, відбивається від дзеркала 11, встановленого на п'єзокоректорі 4, і знову надходить у резонатор лазера через кювету 9 або повз неї залежно від положення диска модулятора 10. Випромінювання, що пройшло через кювету 9 двічі, зазнає:

- поглинання аналізованим газом (наприклад, CH_4), який присутній у пробі, що зменшує модуль коефіцієнта зв'язку зустрічних хвиль до величини $m'_1 = m_1 \exp(-XKL)$;

- зміну фази відбитої хвилі на величину $\Delta\vartheta_1 = 2\pi/\lambda(n_{\text{CH}_4} - n_{\text{в}})XL$.

Розглянемо випадок, коли концентрація CH_4 в кюветі дорівнює $X = 10^{-6}$. Довжина кювети дорівнює 100 мм, інші параметри вказані вище. Тоді у відповідності з (7) нове значення зсуву внаслідок зміни модуля коефіцієнта зв'язку хвиль складе $(\Delta\Omega - \Delta\Omega') = 0,76$ кГц. Значення $\Delta\vartheta_1$ оцінити важко внаслідок відсутності даних щодо зміни показника заломлення CH_4 у цій вузькій спектральній області у випадку насичення поглинання. Однак можна очікувати, що зміна фази відбитої хвилі впливатиме більше (на декілька порядків) на значення зсуву частоти, ніж на зменшення модуля зсуву зустрічних хвиль.

Як видно, зміна частоти за наявності аналізованого компонента у кюветі 9 достатньо значна навіть за низької концентрації аналізованого компонента (концентрація 10^{-6} CH_4 відповідає фоновій концентрації метану в атмосферному повітрі) і за врахування тільки зміни модуля $m_{1,2}$.

Для реєстрації зміни зсуву частоти випромінювання КГЛ воно змішувалося з випромінюванням іншого, стабілізованого по частоті лазера 12. Частота їх биттів реєструється фотоприймачем 13 з малою постійною часу, підсилюється у широкопasmовому підсилювачі 14 і надходить у лічильники 15, 16 робочого й опорного каналів. Лічильники запускаються імпульсами, що надходять з датчика положення модулятора 17 через формувач 18. У лічильнику опорного каналу 16 фіксується частотний зсув за такого положення модулятора 10, коли лазерне випромінювання не проходить через кювету 9; у лічильнику 15 робочого каналу фіксується частотний зсув з урахуванням поглинання випромінювання в кюветі 9. У системі реєстрації 19 відбувається опрацювання частотних сигналів за певним алгоритмом (наприклад, $(\Delta\Omega - \Delta\Omega')/\Delta\Omega$), і результат вимірювань надходить на індикатор 20.

Отже, видно, що перехід до виміру частотних зсувів (замість безпосереднього виміру пропускання) суттєво підвищує точність і чутливість вимірів (за абсолютної нестабільності частоти генерації 10 Гц точність вимірів складає 10^{-6}). Наявність ж фазової складової корисного сигналу, яка в області аномальної дисперсії аналізованої речовини на декілька порядків більша амплітудної складової і лінійно залежить від величини концентрації, дозволяє проводити виміри у широкому діапазоні концентрацій аналізованого компонента. Із цієї причини використання фазової складової корисного сигналу є більш бажаним, оскільки дозволяє досягти високих значень чутливості, селективності й точності аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Г. Долгих И., Привалов В.Е. Лазеры: лазерные системы. Дальнаука (Dolgi G., Privalov V.E. (2009), Lazer: Lazer system. Dalnauka, 202 p. [in Russian]), 2009, 202 c.
2. Демтредер В. Современная лазерная спектроскопия. Долгопрудный: Интеллект (Demtred V. (2014), Modern laser spectroscopy. Dolgoprudny: Intellect, 1072 p. [in Russian]), 2014. — 1072 c.
3. Marlow W.C. // Appl. Opt. 1967. V. 6. № 10. P. 1715—1724.
4. Богданскис Н.И., Букреев В.С., Жижин Г.Н., Попова М.Н. // Современные тенденции в технике спектроскопии / Под ред. Раутиана С.Г. Новосибирск (Bogdanskis N.I., Bukreev V.S., Zyzyn G.N., Popova M.N. (1982). Current trends in spectroscopy technology. Ed. Rautian S.G. Novosibirsk, P. 153—212. [in Russian]), 1982. C. 153—212.
5. Okamoto T., Kawata S., Minami S.A. // Appl. Spectr. 1986. V. 40. №5. P. 691—695.
6. Фридрих Д.М. Сверхчувствительная лазерная спектроскопия: Пер. с англ. / Под ред. Клайджера Д.М. (Fridrih D.M. (1986). Ultrasensitive laser spectroscopy: Per. with engl. Ed. Klaydzera D. M., P. 376—411. [in Russian]), 1986. C. 376—411.
7. Козубовский В.Р., Булыга А.А. // ЖПС (Kozubovsky V.R., Bulyga A.A. (1991). JAS. V.55. №2. P. 300-303. [in Russian]). 1991. T.55. №2. C. 300—303.
8. Козубовский В.Р. // А.с. 1608990 СССР, МКИ G01N 21/45 (Kozubovsky V.R. C.A. 1608990 USSR, MKI G01N 21/45. [in Russian]).
9. Козубовский В.Р. // ЖПС. 1988. Т. 49. №6 (Kozubovsky V.R. (1988). JAS. V. 49. №6. P. 903—908. [in Russian]). C. 903—908.
10. Козубовский В.Р. // ЖПС. 1993. Т.58. № 3/4 (Kozubovsky V.R. (1993). JAS. V..58. № 3/4, P. 355—357. [in Russian]), C. 355—357.
11. Козубовский В.Р. // А.с. 1811287 СССР, МКИ G01N 21/61, 21/39 (Kozubovsky V.R. C.A. 1811287 USSR, MKI G01N 21/61, 21/39. [in Russian]).
12. Козубовський В.Р. // Патент на винахід №100559 UA, МПК G01N 21/61. 2013, Бюл. №1 (Kozubovsky V.R. Patent for invention №100559 UA, MPK G01N 21/61. 2013, Bull. № 1. [in Ukrainian]).

Отримано / received: 15.12.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., О.О. Боровиком, Інститут електронної фізики НАНУ, Україна).

O.O. Borovyk, D. Sc. (Phys.-mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.42-48

УДК 681.518.22

ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНАЦІЇ МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ РОБОТИ ДАТЧИКА ВАГИ KELI QS-D У СИСТЕМІ ЗВАЖУВАННЯ АВТОТРАНСПОРТУ

Using a Combination of Statistical Analysis Methods to Quality Control of the KELI QS-D Weight Sensor in the Automotive Weighing System

І. В. Григоренко, кандидат технічних наук,
професор кафедри інформаційно-вимірювальних
технологій і систем,
e-mail: grigmaestro@gmail.com
С. І. Кондрашов, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри,
e-mail: ksi@kpi.kharkov.ua
С. М. Григоренко, кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних
систем контролю та діагностики,
e-mail: sngloba@gmail.com
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
Україна

Розглянуто вирішення науково-практичної задачі контролю якості роботи датчика ваги KELI QS-D, що входить до складу системи зважування автотранспорту. Контроль якості функціонування є актуальним завданням метрологічного контролю. Важливість цього завдання підкреслюється тим, що організація точного вагового контролю автотранспорту дозволить уникнути значних додаткових витрат під час розрахунків із постачальниками або одержувачами продуктів, знизити ризик аварійних ситуацій, а також запобігти негативному впливу транспорту на полотни автотранспортних доріг.

Перевірка якості роботи датчика ваги KELI QS-D проводиться за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу, лінійного регресійного аналізу та коваріаційного аналізу. Спільне використання трьох видів аналізу дає можливість зробити висновок щодо метрологічної надійності датчика ваги. Використано три серії результатів вимірів показника контролю X (ваги автомобіля). Аналіз підтвердив гіпотезу стосовно відсутності порушень стабільності процесу вимірювання ваги, що дозволяє визнати датчик ваги метрологічно надійним. Доведено, що задачі підвищення достовірності контролю об'єктів зі стохастичними параметрами, підвищення їх метрологічної надійності є актуальними та мають важливе значення для розвитку теорії й практики метрологічного контролю. Рекомендовано збільшити кількість контрольних точок, щоби мати можливість точніше визначити закон розподілу результатів вимірювань та межі довірного інтервалу.

І. В. Hryhorenko, candidate of technical sciences,
professor of the department of information and
measurement technologies and systems,
e-mail: grigmaestro@gmail.com

S. I. Kondrashov, doctor of technical sciences, professor,
head of the department,
e-mail: ksi@kpi.kharkov.ua

S. M. Hryhorenko, candidate of technical sciences,
associate professor of computer and electronic control
and diagnostic systems,
e-mail: sngloba@gmail.com
National technical university
«Kharkiv Polytechnic Institute»,
Ukraine

The paper considers the solution to the scientific and practical problem of quality control of the KELI QS-D weight sensor, which is part of the vehicle weighing system. The control system is designed to measure the weight of vehicles up to 45 tons. Functioning quality control is an urgent task of metrological control. The importance of this task is emphasized by the fact that the organization of accurate weight control of vehicles will avoid significant additional costs in settlements with suppliers or recipients of goods, reduce the risk of accidents, and also prevent the negative impact of transport on the road bed.

Checking the operation of the KELI QS-D weight sensor is performed using: a single factor dispersion analysis (the equation of the median values), a linear regression analysis (no influence of time on the value of the indicator for each voter) and a covariance analysis (no difference in the functional influence of the time on the number of an indicator). The combined use of three types of analysis leads to a conclusion about the metrological reliability of the load cell. Three series of measurement results of the control indicator X (vehicle weight) were used. The analysis confirmed the hypothesis about the absence of disturbances in the stability of the weighing process, which makes it possible to recognize the weight sensor as metrologically reliable. It has been proved that the tasks of increasing the reliability of control of objects with stochastic parameters, increasing their metrological reliability are relevant and important for the development of the theory and practice of metrological control. It is recommended to increase the number of control points in order to be able to accurately determine the distribution law of measurement results and the boundaries of the confidence interval.



І. В. Григоренко



С. І. Кондрашов



С. М. Григоренко

Ключові слова: метрологічна надійність, статистичне оцінювання, датчик, однофакторний дисперсійний аналіз, лінійний регресійний аналіз, коваріаційний аналіз.

Keywords: metrological reliability, statistical evaluation, sensor, a single factor dispersion analysis, a linear regression analysis, a covariance analysis.

ВСТУП

Для того, щоби здійснювати контроль стабільності роботи цифрового тензодатчика *KELI QS-D* фірми *Keli* [1], необхідно навантажувати платформу системи контролю вантажівкою та опрацьовувати три серії даних з одного тензодатчика *KELI QS-D*. Виміри проводимо з інтервалом в одну годину протягом дванадцяти годин. Важливість цієї задачі підкреслюється тими обставинами, що довірчий інтервал для середньоквадратичних похибок виявляється зазвичай вельми широким. У задачах порівняння середніх значень іноді потрібно спочатку виконати перевірку рівності дисперсій.

Дисперсійний аналіз заснований на ряді припущень стосовно випадкових величин і параметрів, що формують похибку експерименту [2—5]: математичне очікування кожної залишкової випадкової величини дорівнює нулю, тобто систематична складова відсутня; залишкові випадкові величини взаємно незалежні (ця вимога означає, що дисперсія суми всіх залишкових випадкових величин дорівнює сумі дисперсій цих величин); всі залишкові випадкові величини мають однакоє середньоквадратичне відхилення (це припущення щодо однорідності дисперсій); кожна залишкова випадкова величина розподілена за нормальним законом (це припущення, як правило, не виконується, але навіть істотні відхилення від нормального закону не мають помітного впливу на процедуру аналізу).

На відміну від дисперсійного та регресійного аналізів коваріаційний аналіз ставить собі за мету дослідити характер взаємозв'язку між залежною величиною — відгуком і набором кількісних й якісних незалежних величин — предикторів і побудувати регресійну модель, тобто він є як би синтезом регресійного і дисперсійного аналізів [3].

Лише сумісне використання трьох видів аналізу надає можливість об'єктивно зробити висновок стосовно метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки (у нашому випадку це цифровий тензодатчик *KELI QS-D* фірми *Keli*).

У роботі [2] тестування параметрів на стабільність зводиться до тестування на сталість середніх значень показників контролю. Математичні моделі тестування при цьому засновані на параметричних моделях дисперсійного, регресійного й коваріаційного аналізів (багатомірному статистичному аналізі), розглянутих у роботах [3—5]. Використання регресійного аналізу в процесі планування наукового

експерименту в задачах багатопараметричної ідентифікації динамічних об'єктів у медичній практиці наведено у роботі [6]. Підвищення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки розглянуто в публікації [7]. У роботі [8] представлено підходи до забезпечення високої метрологічної стабільності вимірювань за допомогою підвищення метрологічної автономності виробничих вимірювальних систем.

Аналіз публікацій виявив необхідність у проведенні дослідження із забезпечення метрологічної надійності датчиків зі застосуванням методів статистичного аналізу.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ

Тензодатчик *QS* — одна з найбільш популярних моделей тензодатчиків, пропонує виробником *Keli*. Він застосовується для залізничних і автомобільних ваг. Ця модель тензодатчиків має такі переваги, як вибухобезпечність, ударостійкість і висока точність. Цифрові тензодатчики *KELI QS-D* у своїй конструкції мають убудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Цифровий сигнал щодо ваги передається за *RS-485* інтерфейсом, що дозволяє значно збільшувати відстань між ваговою платформою і ваговим індикатором (до 1000 м). Клас точності: *OIML R60 C3*. Температурне відхилення чутливості ($\% FS/10^\circ C$): $\pm 0,02 \%/10^\circ C$. Номінальна чутливість (*ISN*): 500000. Температурне відхилення нуля ($\% FS / 10^\circ C$): $\pm 0,02 \%/ 10^\circ C$. Загальна похибка ($\% FS$): $\pm 0,02 \%/FS$ (рис. 1) [1].

Перевірка гіпотези щодо відсутності порушення стабільності роботи датчика ваги за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (рівності середніх значень)

Метод дисперсійного аналізу полягає в перевірці за критерієм *F* нульової гіпотези H_0 стосовно рівності факторної й залишкової дисперсій [4].

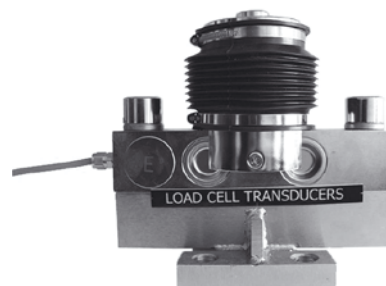


Рис. 1. Датчик *KELI QS-D*
Fig. 1. *KELI QS-D* sensor

Обираємо, що X — це показник контролю, у процесі виміру значення якого отримані вибірки F_j . Припустимо, що $\bar{X}$ — середнє значення всіх результатів спостереження N , а $\bar{X}_j$ — середнє значення j -ої вибірки.

Висунемо гіпотезу: $H_0: H_0: \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \dots = \bar{X}_k = \bar{X}$ (процес не має порушень), тоді справедливе:

$$X_{ji} = \bar{X} + \gamma_j + e_{ji}, \quad (1)$$

де γ_j — відхилення, викликане впливом фактора;

e_{ji} — випадкове відхилення в j -ій групі, для i -го спостереження.

Модель (1) ділиться на два варіанти:

а) параметрична α ;

б) випадкова α, P .

Модель (1) є якісною однофакторною моделлю дисперсійного аналізу.

Якщо існує систематичний зсув середнього значення контрольованого показника, то для виявлення цього зсуву використовують кількісну модель дисперсійного аналізу:

$$X_i = b_0 + b_1 t_i + e_i. \quad (2)$$

Якщо в моделі (2) коефіцієнти b_0, b_1 є випадковими величинами, то результат виміру показника X :

$$X_{ij} = (b_0 + \Delta b_j) + (b_0 + \Delta b_j) \cdot t_{ij} + e_{ij}. \quad (3)$$

Модель (3) дозволяє виявити порушення точності й виявити порушення стабільності.

Розглянемо двовимірне спостереження:

$$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n1}$$

$$x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n2}$$

$$\dots$$

$$x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{knk}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ji} - \bar{X})^2 &= \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} [X_{ji} - \bar{X} + (\bar{X}_j - \bar{X})]^2 = \\ &= \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} [(\bar{X}_j - \bar{X}) + (X_{ji} - \bar{X}_j)]^2 = \\ &= \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} [(\bar{X}_j - \bar{X})^2 + 2(\bar{X}_j - \bar{X}) \times \\ &\quad \times (X_{ji} - \bar{X}_j) + (X_{ji} - \bar{X}_j)^2] = \\ &= \sum_{j=1}^K n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2 + 2 \sum_{j=1}^K (\bar{X}_j - \bar{X}) \cdot (X_{ji} - \bar{X}_j) + \\ &\quad + \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ji} - \bar{X}_j)^2. \end{aligned}$$

де: $G = 2 \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{X}_j - \bar{X}) \cdot (X_{ji} - \bar{X}_j) = 0$, тобто

$$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ji} - \bar{X})^2 = \sum_{j=1}^K n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2 + \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ji} - \bar{X}_j)^2.$$

$$\text{Умова: } \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} e_{ji} = 0; \sum_{j=1}^K \gamma_j = 0.$$

Таблиця 1. Результати дисперсійного аналізу

Table 1. The results of analysis of variance

Джерело впливу	Число ступенів свободи	Сума квадратів відхилень	Середній квадрат відхилень (дисперсія)
γ_i	$W_1 = k - 1$	$S_1 = \sum_{j=1}^K n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2$	$\bar{S}_1 = \frac{S_1}{W_1}$
e_{ji}	$W_2 = N - k$	$S_2 = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ji} - \bar{X}_j)^2$	$\bar{S}_2 = \frac{S_2}{W_2}$
$(\gamma_i + e_{ji})$	$W = N - 1$	$S = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ji} - \bar{X})^2$	$\bar{S} = \frac{S}{W} = D_X$

$$F = \bar{S}_1 / \bar{S}_2;$$

де F — випадкові величини з F — розподілом.

Результати дисперсійного аналізу зведено до таблиці 1.

Дані отримані з датчиків тиску представлено у таблиці 2.

Задаємо бажану надійність висновку — встановлюємо рівень значимості $\alpha = 0,05$ ($P = 0,95$).

Середнє значення за трьома вибірками: $\bar{X} = 16533,17$ кг.

Визначимо загальну, факторну й залишкову суми квадратів відхилень від середнього.

Загальна сума квадратів відхилень спостережуваних значень від загального середнього:

$$S_{\text{заг}} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^q (X_{ij} - \bar{X})^2.$$

$$S_{\text{заг}} = 39 \text{ кг.}$$

Таблиця 2. Вихідні дані

Table 2. Initial data

i , год	Значення вихідних сигналів W , кг		
	Вибірка F_1	Вибірка F_2	Вибірка F_3
1	16534	16534	16535
2	16534	16535	16535
3	16533	16533	16533
4	16532	16532	16531
5	16532	16534	16532
6	16533	16532	16534
7	16533	16533	16533
8	16532	16534	16534
9	16534	16534	16534
10	16534	16533	16533
11	16533	16533	16532
12	16532	16531	16534
$\bar{X}_{\text{гп } j}$	16533	16533,17	16533,33

Факторна сума відхилень групових середніх від загальної середньої, що характеризує розсіювання між групами:

$$S_{\text{факт}} = q \sum_{j=1}^p (\bar{X}_{\text{гр}j} - \bar{X})^2.$$

$$S_{\text{факт}} = 0,667 \text{ кг.}$$

Залишкова сума квадратів відхилень спостережуваних значень групи від свого групового середнього, що характеризує розсіювання усередині груп:

$$S_{\text{зал}} = \sum_{i=1}^q (X_{i1} - \bar{X}_{\text{гр}1})^2 + \sum_{i=1}^q (X_{i2} - \bar{X}_{\text{гр}2})^2 + \dots + \sum_{i=1}^q (X_{iN} - \bar{X}_{\text{гр}N})^2.$$

$$S_{\text{зал}} = 38,33 \text{ кг.}$$

Розділивши суми квадратів на відповідне число ступенів свободи, отримаємо загальну, факторну й залишкову дисперсії:

$$S_{\text{заг}}^2 = \frac{S_{\text{заг}}}{k \cdot N - 1}, S_{\text{факт}}^2 = \frac{S_{\text{факт}}}{k - 1}, S_{\text{зал}}^2 = \frac{S_{\text{зал}}}{k \cdot (N - 1)}.$$

$$S_{\text{заг}}^2 = \frac{S_{\text{заг}}}{12 \cdot 3 - 1}, S_{\text{факт}}^2 = \frac{S_{\text{факт}}}{12 - 1}, S_{\text{зал}}^2 = \frac{S_{\text{зал}}}{12 \cdot (3 - 1)}.$$

$$S_{\text{заг}}^2 = 1,114 \text{ кг;}$$

$$S_{\text{факт}}^2 = 0,060 \text{ кг;}$$

$$S_{\text{зал}}^2 = 1,597 \text{ кг.}$$

Якщо справедлива гіпотеза H_0 [2, 3], то всі ці дисперсії є незміщеними оцінками генеральної дисперсії. Покажемо, що перевірка нульової гіпотези зводиться до порівняння факторної й залишкової дисперсій за критерієм Фішера-Снедекора [3].

1. Припустимо, що гіпотеза H_0 правильна. Тоді факторна й залишкова дисперсії є незміщеними оцінками невідомої генеральної дисперсії й, відтак, різняться незначимо. Тому результат оцінки за критерієм Фішера-Снедекора (F) покаже, що нульова гіпотеза приймається. Отже, якщо вірна гіпотеза щодо рівності математичних очікувань генеральних сукупностей, то вірна й гіпотеза щодо рівності факторної й залишкової дисперсій [4].

2. Якщо нульова гіпотеза невірна, то зі зростанням розбіжності між математичними очікуваннями збільшується й факторна дисперсія, а разом із нею й відношення $F_{\text{спост}} = S_{\text{факт}}^2 / S_{\text{зал}}^2$. Тому в результаті $F_{\text{спост}}$ виявиться більшим за $F_{\text{кр}}$, і гіпотеза щодо рівності дисперсій буде відкинута. Отже, якщо гіпотеза щодо рівності математичних очікувань генеральних сукупностей помилкова, то помилкова й гіпотеза щодо рівності факторної й залишкової дисперсій [4]:

$$F_{\text{спост}} = 0,038.$$

$$F_{\text{кр}} = 3,32.$$

Оскільки $F_{\text{кр}} > F_{\text{спост}}$, гіпотеза щодо рівності математичних очікувань генеральних сукупностей

підтверджується, а, отже, підтверджується й гіпотеза щодо рівності факторної й залишкової дисперсій.

Перевірка гіпотези щодо відсутності порушення стабільності роботи датчика ваги за допомогою лінійного регресійного аналізу (на відсутність впливу часу на величину показника за кожною вибіркою)

Припустимо, що X — це показник контролю, для якого отримана вибірка з n -парних спостережень $\{X_i, t_i\}$ [3]:

$$X = (X_1, t_1), (X_2, t_2), \dots, (X_n, t_n),$$

де X_i — обмірюване значення показника;

t_i — момент часу спостереження.

Отриманий часовий ряд може бути апроксимований лінійною функцією $\hat{X}_i = a + b \cdot t_i$ — лінійна регресійна модель.

Для стабільного технічного процесу кутовий коефіцієнт $b = 0$, отже, для нестабільного технологічного процесу $b \neq 0$.

Початкові умови: закон розподілу значень X_i відносно прямої $\hat{X}_i$ є нормальним. Результат виміру: $x_i = \hat{X}_i + e_i$ (залишок e_i — випадкова складова регресійної моделі) [3].

$$X_i = \hat{X}_i + e_i, \quad (5)$$

$$X_i = a + b \cdot t_i + e_i,$$

де X_i — повна модель спостереження показника X ;

Для розрахунку коефіцієнтів a, b використовують метод найменших квадратів (МНК). Визначимо суму квадратів відхилення значень X_i від регресії $\hat{X}_i$.

$$L = \sum_{i=1}^n [X_i - (a + b \cdot t_i)]^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - a - b \cdot t_i)^2 = \min.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial a} &= 2 \sum_{i=1}^n (X_i - a - b \cdot t_i) \cdot (-1) = 0 \left| \sum_{i=1}^n X_i - n \cdot a - b \sum_{i=1}^n t_i = 0 \right. \\ \frac{\partial L}{\partial b} &= 2 \sum_{i=1}^n (X_i - a - b \cdot t_i) \cdot (-t_i) = 0 \left| \sum_{i=1}^n X_i \cdot t_i - a \sum_{i=1}^n t_i - b \sum_{i=1}^n t_i^2 = 0 \right. \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де (6) — система нормальних рівнянь [3].

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - b \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \right) = \bar{X} - b \cdot \bar{t}. \quad (7)$$

$$b = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \cdot t_i - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2} = \frac{\text{cov}(X, t)}{D_x}. \quad (8)$$

де cov — момент зв'язку другого порядку [3],

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i.$$

Стандартне залишкове відхилення визначається за формулами:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (9)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2}. \quad (10)$$

Коефіцієнт парної кореляції:

$$R^2 = \frac{\text{cov}^2(Xt)}{D_x D_t}, \quad (11)$$

де $D_x = \sqrt{\sigma_x}$, $D_t = \sqrt{\sigma_t}$, $\text{cov}^2(Xt)$ — коваріація між X и t .

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} (n-2). \quad (12)$$

Тепер із таблиці F — розподілу [3] вибираємо F_{KP} , що дорівнює $F_{KP} = F_{1,(n-2),\alpha}$. Якщо $F < F_{KP}$, то гіпотеза щодо стабільності процесу підтверджується [3].

Використовуючи дані таблиці 2, розглянемо вибірку F_1 .

Стандартні залишкові відхилення визначимо за формулами (9) та (10).

Після розрахунків отримали такі результати:

$$\sigma_x = 3729,86,$$

$$\sigma_t = 3,606.$$

Пряма регресії описується таким рівнянням:

$$\bar{X} = a + b\bar{t}.$$

Значення a та b визначаємо за формулами (7) та (8) відповідно. Після розрахунків отримані такі результати:

$$a = -0,0489,$$

$$b = 16533,18.$$

Графічне відображення прямої регресії вибірки F_1 представлено на рис. 2.

Для того, щоби перевірити гіпотезу щодо відсутності порушень стабільності технологічного контролю за допомогою регресійної моделі аналізу, необхідно розрахувати коефіцієнт парної кореляції R^2 , розрахунок виконаємо за формулою (11). Після розрахунків отримано такі результати:

$$D_x = 61,07,$$

$$D_t = 1,898,$$

$$R^2 = 0,0029.$$

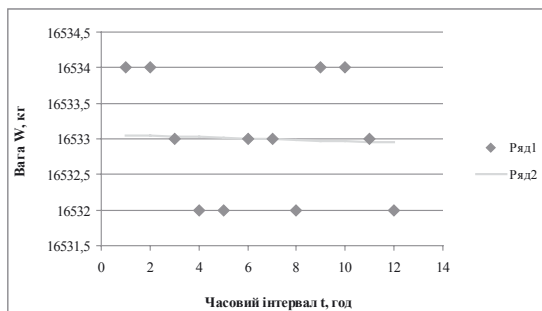


Рис. 2. Графічне відображення прямої регресії вибірки F_1

Fig. 2. Graphical representation of the direct regression of the sample F_1

Для того, щоби спростувати або підтвердити гіпотезу щодо порушення стабільності процесу вимірювання ваги автотранспорту за допомогою регресійної моделі аналізу, необхідно розрахувати коефіцієнт F_p за формулою (12):

$$F_p = 0,0294.$$

Розрахований коефіцієнт F_p необхідно порівняти з F_{KP} , який вибирається з таблиці 5% точок F розподілу [3].

$$F_{KP} = F_{1,(n-2),\alpha} = F_{1,10,0,05}.$$

F_{KP} дорівнює 2,97. Оскільки $F_p < F_{KP}$, то гіпотеза щодо стабільності процесу підтверджується, вибірка F_1 приймається [3].

Скориставшись наведеними вище формулами, проведемо аналогічний розрахунок для вибірок F_2 і F_3 [3].

Стандартні залишкові відхилення для вибірки F_2 вийшли такими:

$$\sigma_x = 3729,64,$$

$$\sigma_t = 3,6056.$$

Коефіцієнти, необхідні для побудови регресійної прямої, визначаємо за формулами (7) та (8) відповідно:

$$a = -0,1398,$$

$$b = 16534,075.$$

Графічне відображення прямої регресії вибірки F_2 представлено на рис. 3.

Коефіцієнт парної кореляції R^2 визначається за формулою (11):

$$R^2 = 0,024,$$

коефіцієнт F_p — за формулою (12): $F_p = 0,0239$.

F_{KP} дорівнює 2,97 [3]. Оскільки $F_p < F_{KP}$, то гіпотеза щодо стабільності процесу підтверджується, вибірка F_2 приймається.

Стандартні залишкові відхилення для вибірки F_3 вийшли такими:

$$\sigma_x = 3729,945,$$

$$\sigma_t = 3,6056.$$

Коефіцієнти, необхідні для побудови регресійної прямої, a і b вийшли такими:

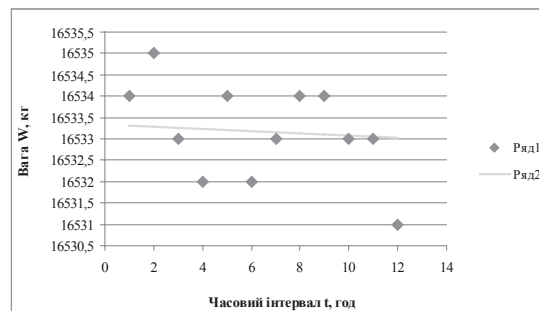


Рис. 3. Графічне відображення прямої регресії вибірки F_2

Fig. 3. Graphical representation of the direct regression of the sample F_2

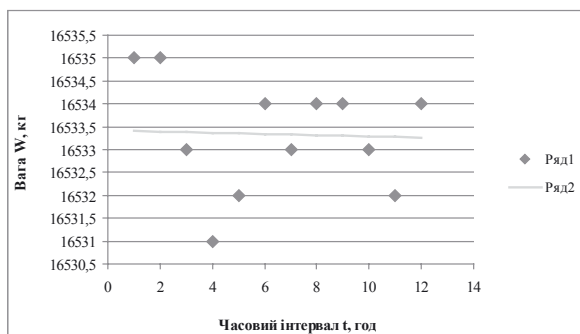


Рис. 4. Графічне відображення прямої регресії вибірки F_3

Fig. 4. Graphical representation of the direct regression of the sample F_3

$$a = -0,062, \\ b = 16533,74.$$

Графічне відображення прямої регресії вибірки F_3 представлено на рис. 4.

Коефіцієнт парної кореляції R^2 визначається за формулою (11):

$$R^2 = 0,00485;$$

коефіцієнт F_p — за формулою (12): $F_p = 0,0487$.

$F_{кр}$ дорівнює 2,97 [3]. Оскільки $F_p < F_{кр}$, то гіпотеза щодо стабільності процесу підтверджується, вибірка F_3 приймається.

Перевірка гіпотези щодо відсутності порушення стабільності роботи датчика ваги за допомогою коваріаційного аналізу (відсутність розходжень у функціональному впливі часу на величину показника)

Коваріаційні моделі порушення стабільності засновані на дисперсійному аналізі коефіцієнтів лінійності дисперсії [3]:

$$\hat{x}_{k_i} = A_k + B_k \cdot t_i, i = \overline{1, n_k}; \\ \hat{x}_{j_i} = A_j + B_j \cdot t_i, i = \overline{1, n_j}; \\ \sum_{j=1}^k n_j = N.$$

Загальна регресія має вид:

$$\hat{x}_i = A + B \cdot t_i, i = \overline{1, N}. \quad (13)$$

Аналізувати можна мінімум три регресії.

У процесі коваріаційного аналізу можна перевірити одну основну гіпотезу й кілька альтернативних [3]:

- а) $H_0 : B = 0$;
- б) $H_1^{(1)} : A_1 = \dots = A_k, B_1 = \dots = B_k$;
- в) $H_1^{(2)} : B_1 = \dots = B_k$;
- г) $H_1^{(3)} : A_1 \neq \dots \neq A_k, B_1 \neq \dots \neq B_k$.

$$S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - \bar{x})^2 = S_0 + S_{AB} + S_{\gamma_0}, \quad (14)$$

де $S_0 = \omega_0 + B_0^2$;

$$S_{\gamma_0} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - A_j - B_j \cdot t_{ji})^2; \quad (15)$$

$$\omega_0 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (t_{ji} - \bar{t})^2; \quad (16)$$

$$B_0 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ji} \cdot t_{ji} - \bar{x} \cdot \bar{t}}{\frac{1}{N} \omega_0}; \quad (17)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} t_{ji}, \text{ де } i = \overline{1, n_j}, j = \overline{1, k}.$$

$$1. F_0 = \bar{S}_0 / \bar{S}_{\gamma_0}.$$

Із таблиці F -розподілу вибираємо $F_{кр}$, яке дорівнює: $F_{кр} = F_{1, (N-2k), \alpha}$.

Якщо $F_0 > F_{кр}$, то це свідчить, що порушено процес стабільності.

$$2. F_1 = \bar{S}_{AB} / \bar{S}_{\gamma_0}.$$

У цьому випадку $F_{кр}$ будемо визначати з умови, що $F_{кр} = F_{2(k-1), (N-2k), \alpha}$. Якщо $F_1 > F_{кр}$, то це свідчить щодо наявності шуму.

Висунемо гіпотезу $H_0: B = 0$ і альтернативну їй $H_1^{(1)} : A_1 = \dots = A_k, B_1 = \dots = B_k$.

Таблиця 3. Результати коваріаційного аналізу

Table 3. The results of covariance analysis

Джерело впливу на x_j	Сума квадратів відхилень	Число ступенів свободи	Середній квадрат
B_0	$S_0 = \omega_0 + B_0^2 = 429,007$	$\nu_0 = 1$	$\bar{S}_0 = \frac{S_0}{1} = S_0$
(AB)	$S_{AB} = S - S_0 - S_{\gamma_0} = -290,0$	$\nu_{AB} = 2k - 2 = 4$	$\bar{S}_{AB} = \frac{S_{AB}}{\nu_{AB}} = 72,5$
Випадкова залишок	$S_{зал} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - A_j - B_j \cdot t_{ji})^2 = 136,749$	$\nu_{зал} = N - 2k = 6$	$\bar{S}_{зал} = \frac{S_{зал}}{\nu_{зал}} = 22,79$
Загальний	$S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - \bar{x})^2 = 39$	$\nu = N - 1 = 11$	

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 429. \\ B_0 &= -0,0839. \\ S_0 &= 429,007.\end{aligned}$$

Результати коваріаційного аналізу зведено у таблицю 3.

Перевірка гіпотез [3]:

$$F_0 = \bar{S}_0 / \bar{S}_{70} = 3,15.$$

Із таблиць 5 % точок F -розподілу вибираємо $F_{кр}$, що дорівнює:

$$F_{кр} = F_{1,(N-2k),\alpha} = F_{1,6,0.05} = 4,49.$$

Оскільки $F_0 < F_{кр}$, то це свідчить, що процес стабільний.

$$F_1 = \bar{S}_{AB} / \bar{S}_{70} = 3,18.$$

У цьому випадку, вибираємо $F_{кр}$, що дорівнює $F_{2(k-1),(N-2k),\alpha}$.

Виберемо з таблиць 5 % точок $F_{кр}$: $F_{кр} = F_{4,6,0.05} = 4,28$.

Оскільки $F_1 < F_{кр}$, то це свідчить, що шуму немає.

ВИСНОВКИ

Виконано перевірку гіпотези щодо відсутності порушень стабільності роботи датчика ваги за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (рівність

середніх значень), лінійного регресійного аналізу (на відсутність впливу часу на величину показника на кожній виборці), коваріаційного аналізу (відсутність розбіжностей у функціональному впливі часу на величину показника контролю X). Використано три серії результатів вимірів показника контролю X (ваги вантажівки), отриманих з датчика ваги *KELI QS-D* протягом 12 годин ($i = 1, 2, \dots, 12$ годин). Аналіз підтвердив гіпотезу щодо відсутності порушень стабільності процесу вимірювання ваги вантажівки, що дає можливість визнати датчик ваги метрологічно надійним. Такий висновок зроблено на основі того, що в процесі вимірювань у системі контролю ваги автотранспорту, припускаючи, що похибки підпорядковуються нормальному закону розподілу, користуються довірчим інтервалом $\Delta_4 = \pm 2\sigma_0 = \pm 2$ кг ($P = 0,95$). Отже, для підтвердження неперевищення максимально допустимого значення похибки вимірювання ваги потрібно проводити частіше (як мінімум кожні пів години), щоби мати можливість точно визначити закон розподілу результатів вимірювань та границі довірчого інтервалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Tsyfrovi datchyky dlya avtomobil'nykh vah (Цифрові датчики для автомобільних ваг) // <https://kvz.in.ua/ua/tenzodatchiki/t-sifrovoj-datchik-dlya-avtomobilnyh-vesov-keli-qs-d>.
2. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер; пер. с англ. А.С. Мони́на — Москва: Мир (Kramer G. Matematicheskiye metody statistiki [Mathematical Methods of Statistics]. Moscow), 1975. — 648 с/р.
3. М.Дж. Кендалл. Многомерный статистический анализ и временные ряды / Дж. Кендалл, А. Стюарт — Москва: Наука (Kendall M.J., Stuart A. Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady [Multivariate statistical analysis and time series]. Moscow (in Russian)). 1978. — 736 с/р.
4. Шефе Г. Дисперсионный анализ / Г. Шефе; пер. с англ. Б.А. Севостьянов. — [2-е изд.] — Москва: Наука (Sheffe G. Dispersionnyy analiz [Analysis of variance]. Moscow (in Russian)), 1980. — 512 с/р.
5. Давиденко А.П. Организация и планирование научных экспериментов, патентование: [учеб. пособие] / А.П. Давиденко — Харків: НТУ «ХПИ» (Davidenko A.P. Organizaciya i planirovanie nauchnykh eksperimentov, patentovedenie: [ucheb. posobie] / A.P. Davidenko — Kharkiv: NTU «HPI» (in Russian)), 2004. 320 с/р.
6. Shchapov P.F., Tomashevsky R.S., Zoltman E.V. Informatsionnyy analiz regressiynoy modeli faktornogo planirovaniya medico-biologicheskogo eksperimenta [Information analysis of the regression model of factor planning of a life-science experiment]. Ukrainian Metrological Journal, 2017, no. 1, pp. 58—62 (in Russian). doi: 10.24027/2306-7039.1.2017.102000
7. Ignatkin V. Osoblyvosti analizu dynamichnoi pokhybky v protsesi otsiniuvannia metrolohichnoi nadiinosti zasobiv vymiriuvanoi tekhniki [Features of Dynamic Error Analysis in the Process of Evaluation of Metrological Reliability of Measuring Equipment]. Metrology and Instruments, 2019, no. 2, pp. 36–42 (in Ukrainian). doi: 10.33955/2307-2180(2)2019.36-42
8. Mykyuchuk M., Kochan R., Kochan O. et al. Increasing metrological autonomy of in-plant measuring systems. Advances in Science and Technology, 2016, vol. 10, no. 32, pp. 193–197. doi: 10.12913/22998624/65126

Отримано / received: 03.02.2021.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.І. Чумаковим, Харківський національний університет радіоелектроніки (Україна).

Prof. V.I. Chumakov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.49-56

УДК 543.42:664

ЗАСТОСУВАННЯ ІМПЕДАНСНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НІТРИТУ НАТРІЮ В М'ЯСНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТАХ

Application of Impedance Method for Determination of Sodium Nitrite in Meat Foods

Ю. В. Слива, кандидат технічних наук, доцент кафедри стандартизації та сертифікації с.-г. продукції, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, e-mail: yuliia_slyva@ukr.net

Є. В. Походило, доктор технічних наук, професор кафедри метрології, сертифікації та стандартизації, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: evgenp@meta.ua
<https://orcid.org/0000-0003-2592-6822>
<https://orcid.org/0000-0002-9995-3148>

Yu. V. Slyva, candidate of technical sciences, associate professor of the department of standardisation and certification of agricultural products, National university of life and environmental sciences, Kyiv, Ukraine, e-mail: yuliia_slyva@ukr.net

E. V. Pokhodylo, doctor of technical sciences, professor of the department of metrology, certification and standardization, Lviv Polytechnic national university, Ukraine, e-mail: evgenp@meta.ua
<https://orcid.org/0000-0003-2592-6822>
<https://orcid.org/0000-0002-9995-3148>

Представлено результати досліджень можливості застосування методу імпедансного аналізу для виявлення нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах. Запропоновано визначати наявність харчової добавки нітрит натрію (Е 250), яка використовується в харчовій промисловості як фіксатор кольору та консерванту в продукції з м'яса та риби, за параметрами комплексної провідності (адмітансу) двополюсника. Метод передбачає пропускання струму різної частоти через харчові продукти зазначеної групи і вимірювання електропровідності та визначення й аналізування частотної залежності імпедансу. Вимірювання активної G складової та реактивної B складової адмітансу проводили на різних частотах від 100 Гц до 100 кГц. Оскільки найчастіше нітрит натрію додається до м'ясної продукції, то для проведення експерименту готували проби фаршу яловичого та фаршу зі свинини, з урахуванням рекомендацій Codex Alimentarius щодо дозування харчової добавки Е 250. Температура досліджуваних продуктів — $(22 \pm 0,2)^\circ\text{C}$. У результаті досліджень отримано залежності складових адмітансу від частоти для контрольних проб фаршу яловичого та фаршу зі свинини та проб із додаванням нітриту натрію. Встановлено залежність активної складової та реактивної складової адмітансу м'ясних продуктів без додавання нітриту натрію та з додаванням у зазначених кількостях до м'яса продукту. Відмінність полягає у зміні характеру залежностей. Характер кривих для нітриту натрію як фаршу яловичого, так і фаршу зі свинини подібний. Спостерігається істотне перевищення значень активної та реактивної складових адмітансу, з чітким виокремленням піку характе-

ристики реактивної складової для м'ясних харчових продуктів, які містили в своєму складі нітрит натрію порівняно з контрольними пробами. Отже, застосування методу імпедансного аналізу є можливим для оперативного виявлення фіксатора кольору та консерванту нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах.

The article presents the results of research on the possibility of using the method of impedance analysis to detect sodium nitrite in meat foods. It is proposed to determine the presence of the food additive sodium nitrite (E 250), which is used in the food industry as a color fixative and preservative in meat and fish products, according to the parameters of the complex conductivity (admittance) of the bipolar. The method involves passing a current of different frequency through the food of this group and measuring the electrical conductivity and determining and analyzing the frequency dependence of the impedance. Measurements of the active G component and the reactive B component of the admittance were performed at different frequencies from 100 Hz to 100 kHz. Since sodium nitrite is most often added to meat products, samples of ground beef and minced pork were prepared for the experiment, taking into account the recommendations of Codex Alimentarius on the dosage of food additive E 250. The temperature of the studied products is $22 \pm 0.2^\circ\text{C}$. As a result of researches dependences of components of admittance on frequency for control samples of forcemeat of beef and forcemeat from pork and samples with addition of sodium nitrite are received. The dependence of the active component and the reactive component of the admixture of meat products without the addition of sodium nitrite and



Ю. В. Слива



Є. В. Походило

with the addition of these amounts to the weight of the product. The difference is in changing the nature of the dependencies. The nature of the curves for sodium nitrite as minced beef and minced pork is similar. There is a significant excess of the values of the active and reactive components of the admittance, with a clear separation

of the peak characteristics of the reactive component for meat foods that contain sodium nitrite in comparison with control samples. Therefore, the application of the method of impedance analysis is possible for the rapid detection of color fixative and preservative of sodium nitrite in meat foods.

Ключові слова: імпедансний аналіз, харчові добавки, нітрит натрію, м'ясні харчові продукти.

Keywords: impedance analysis, food additives, sodium nitrite, meat foods.

З глобалізацією ринків реалізації харчових продуктів питання збільшення терміну споживання та збереження товарного вигляду продукції набули першочергового значення. Разом із цим недобросовісні виробники та оператори ринку харчових продуктів, які вводять продукцію до реалізації, достатньо часто використовують харчові добавки для шахрайства та фальсифікації, що стало достатньо гострим питанням як для операторів ринку харчових продуктів, так і для державних контролювальних органів та споживачів. Найбільш поширеними методами фальсифікації харчових продуктів є розбавлення, підміна, приховування інформації, неправильне маркування та підроблення. Для забезпечення певних органолептичних характеристик фальсифікованих харчових продуктів, а також підвищення терміну споживання продукції, виготовленої зі сировини низької якості, як правило, додають добавки, які посилюють чи стабілізують колір та пригнічують розвиток мікроорганізмів, тим самим створюючи умови, за яких достатньо важко відрізнити справжність та автентичність продукту та встановити справжні загрози для здоров'я споживачів. Установити справжність харчового продукту та безпечність його для кінцевого споживача можливо лише у результаті проведення складних та ресурсовитратних лабораторних досліджень. Такою добавкою, яку часто недобросовісні виробники використовують для приховування шахрайства та подовження терміну зберігання харчових продуктів, є нітрит натрію. Він використовується для покращення кольору та як консервант для харчових продуктів із м'яса та риби. Харчова добавка E 250 має антиоксидантну дію внаслідок взаємодії з міоглобіном м'яса, надаючи м'ясним продуктам характерного рожевого чи червоного кольору. Окрім того, нітрит натрію використовується як антибактеріальна добавка, яка попереджує розвиток бактерій *Clostridium botulinum*, збудників ботулізму.

Разом із позитивним впливом на характеристики харчових продуктів нітрит натрію є токсичною речовиною у випадку передозування. У результаті термічного оброблення харчових продуктів, які містять E 250, утворюються нітрозаміни, які є канцерогенними речовинами та можуть сприяти онкологічним захворюванням. Було встановлено залежність

між частим вживанням харчових продуктів, що містять нітрит натрію, та раком кишківника, захворюваннями легенів, печінки, дисбактеріозами, холециститом та алергічними реакціями. Тому нітрит натрію жорстко нормується в харчових продуктах і його доза не має перевищувати 60 мг нітриту натрію на 1 кг готового продукту, а для дитячого харчування — не більше 30 мг на 1 кг.

Для виявлення нітритів та нітратів застосовують фотометричні методи, іонометричні, флуориметричні, хемілюмінесцентні та інші. Недоліком усіх зазначених методів є неможливість швидкого і селективного виявлення нітритів та нітратів у харчових продуктах. Усі зазначені методи є складними та тривалими у застосуванні, потребують високоточних вартісних засобів вимірювальної техніки та приладів.

У свою чергу метод імпедансного аналізу, як ефективна аналітична методика визначення фізико-хімічних характеристик, останнім часом набув широкого застосування для оцінки якості та безпечності харчових продуктів. Імпедансний метод має ряд переваг: швидкий, неруйнівний, недорогий і легко застосовний, демонструє потенціал для розвитку інструменту виявлення фальсифікованої продукції у режимі он-лайн для заміни традиційних методів та методик.

Отже, удосконалення метрологічного забезпечення та вивчення можливості застосування методу імпедансного аналізу для виявлення нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах, який може стати предметом фальсифікації та небезпеки, є надзвичайно актуальними.

Імпедансний метод, як ефективна аналітична методика визначення фізико-хімічних характеристик, останнім часом набув широкого застосування для оцінки якості та безпечності харчових продуктів.

Нині імпедансний метод аналізу застосовується у широкому спектрі галузей [1, 2]: від мікробіології [3—5] до аналізу складу людського тіла [6—8], характеристики та оцінки якості різних харчових продуктів та води [9].

Якщо розглядати імпедансний метод аналізу як метод контролю показників якості та безпечності, треба виділити роботи В. Алейнікова, Є. Походила, О. Шебетовської зі співавторами стосовно визначення

свіжості м'яса [9—12], *M. Chanet* зі співавторами щодо виготовлення м'ясних продуктів [13], *A. Bauchot, A. Chowdhury, F. Harker and S. Forbes* щодо оцінки якості плодів і ягід [14—15], *M. Grossi* зі співавторами стосовно визначення показників безпечності молока, морозива та оливкової олії [16—17], визначення глутамату натрію [18]. Усі дослідження зводяться до того, що метод імпедансного аналізу — швидкий, неруйнівний, недорогий і легко застосовний.

У свою чергу нині перед виробниками харчових продуктів, споживачами, державними контролювальними органами та іншими зацікавленими сторонами постають суттєві виклики щодо фальсифікації харчових продуктів, надання продукції з м'яса та риби додаткових споживчих характеристик, які впливають на вибір споживача, та розроблення швидких та ефективних методів і метрологічного забезпечення до них для виявлення фальсифікованих продуктів з метою отримання економічного зиску.

Фальсифікація харчових продуктів передбачає сукупність дій, спрямованих на умисне підмінення, змінення чи підроблення харчових продуктів чи окремих інгредієнтів, пакування та маркування, а також на надання невірної або такої, що вводить в оману інформації стосовно продукту для отримання економічно мотивованої вигоди. Серед методів фальсифікації м'ясних харчових продуктів, зокрема ковбас та ковбасних виробів, найбільш використовуваними є підміна — замінювання інгредієнта чи частини продукту, що має високу вартість, іншим інгредієнтом чи частиною продукту нижчої вартості; приховування інформації — приховування інформації стосовно низької якості харчових продуктів чи інгредієнтів; неправильне маркування — розміщення невірної інформації на пакуванні для отримання економічного зиску; несанкціоноване внесення змін у рецептуру — додавання невідомих та неідентифікованих інгредієнтів у харчові продукти для покращення їх якісних характеристик; підроблення — копіювання певної торгової марки, пакування, рецептури, способу виробництва тощо для отримання економічного зиску. Майже всі зазначені методи шахрайства з харчовими продуктами передбачають внесення певних добавок, які дозволять зберегти або покращити органолептичні характеристики харчових продуктів, такі як смак, запах, консистенція чи колір, та збільшити їх термін зберігання. Одним із найбільш поширених видів харчових добавок, які дозволяють підсилити колір м'ясних продуктів та підвищити термін зберігання, є нітрит натрію. Нітрит натрію є дозволеною харчовою до-

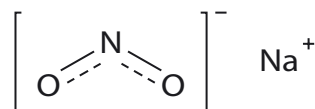


Рис. 1. Структурна формула натрієвої солі азотистої кислоти

Fig. 1. The structural formula of the sodium salt of nitric acid

бавкою в ЄС, США та Україні, але достатньо часто її застосовують для приховування таких видів фальсифікації, як підміна, несанкціоноване внесення змін у рецептуру, використання неякісної та небезпечної сировини. Також відомі такі випадки шахрайства з нітритом натрію в харчових продуктах як приховування інформації та неправильне маркування, тобто харчова добавка не вказується в складі продукту, «прихована» за надписом «суміш спецій» або на етикетці вказано «без нітриту натрію», а в результаті лабораторного випробування нітриту ідентифікуються.

Хімічною назвою нітриту натрію (E 250) є натрієва сіль азотистої кислоти, хімічна формула NaNO_2 . Фізичний стан — біла зі сіруватим чи жовтуватим відтінком кристалічна речовина, добре розчинна у воді та гігроскопічна. Структурна формула представлена на рис. 1. Нітрит натрію є речовиною токсичної дії у разі її споживання у великих кількостях [19].

Саме тому в разі фальсифікації м'ясних харчових продуктів шляхом підміни, використання сировини нижчої якості, небезпечної за біологічними показниками тощо, що призводить до втрати якісних характеристик, зменшення терміну зберігання та показників безпечності м'ясних виробів, використовують нітрит натрію.

Сучасні дослідження однозначно встановили небезпечну дію нітриту натрію та його сполук, які утворюються в результаті надмірного додавання у харчові продукти, на організм людини [20].

Нітрит натрію чинить подразнювальну дію на шкіру та слизові оболонки, може проникати через непошкоджену шкіру в організм людини. Споживання у надмірній кількості нітриту натрію із харчовими продуктами може призвести до зниження тону м'язів, розширення судин та різкого зниження тиску. Також можуть спостерігатися ознаки отруєння, такі як слабкість, блювота, втрата свідомості, порушення зору, посиніння кінчиків пальців рук та ніг. Але потрібно відзначити, що такий вплив мають нітриту за споживання у концентраціях вищих ніж встановлено, як допустимі. Більш небезпечним є канцероген N-нітрозамін, який утворюється під час реакції нітриту натрію з амінокислотами м'яса та риби під

час нагрівання. Потрапляння нітрозамінів у організм людини провокує онкологічні захворювання, зокрема рак кишківника, абструптивні захворювання легень.

Установлені норми використання нітриту натрію становлять 50 мг/кг готового продукту. За споживання дорослою людиною нітриту натрію в складі харчових продуктів більше 2 г на добу можуть бути летальні наслідки [20]. Окрім того, визначення харчові продукти, для яких заборонено застосування нітриту натрію. Зокрема, це страви з м'яса, риби, птиці, варених ковбасних виробів, консервів, напівфабрикатів та приправ, які споживаються дітьми віком до 3 років.

У разі використання нітриту натрію в рецептурах харчових продуктів виробники повинні вказувати на маркуванні або назву харчової добавки або код Е 250 з поясненням складу добавки. Якщо ж виробник зазначає на пакуванні «без нітриту натрію», мають бути документальне підтвердження його відсутності та наявності протоколів дослідження випробувальних лабораторій, акредитованих на такий вид випробувань.

Відомі способи визначення нітритів та нітратів у м'ясних продуктах із застосуванням спектрометричного методу [21], методу іонообмінної хроматографії [22] тощо.

Недоліком усіх зазначених методів є неможливість швидкого і селективного виявлення нітритів та нітратів. Усі зазначені методи є складними та тривалими у застосуванні, вони потребують високоточних вартісних засобів вимірювальної техніки та приладів.

Метою і завданням цієї роботи є дослідити доцільність застосування імпедансного аналізу та розробити спосіб оперативного контролю для отримання визначеної інформації стосовно наявності нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах.

Відповідно до мети визначено такі завдання:

- дослідити доцільність застосування методу імпедансного аналізу для визначення вмісту харчової добавки нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах;
- проаналізувати кількісні значення активної та реактивної складових адмітансу в процесі застосування імпедансного аналізу виявлення нітриту натрію, за характером зміни кривих їх залежності від частоти;
- установити відмінності графічних характеристик зміни активної та реактивної складових адмітансу під час застосування імпедансного методу

для ідентифікації наявності нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктами експериментальних досліджень були фарш яловичий та зі свинини без харчової добавки та з добавкою. Еталонними зразками (базовими) прийнято зразки фаршу яловичого та зі свинини з додаванням нітриту натрію. Контрольованими зразками прийнято зразки з додаванням нітриту натрію відповідно до рекомендацій *Codex Alimentarius* щодо дозування харчової добавки Е 250. Відповідно, до фаршу яловичого та зі свинини додали 0,6% нітриту натрію до маси продуктів дослідження. Температура досліджуваних продуктів — $(22 \pm 0,2)$ °С. Технологічні характеристики зразків представлено у табл. 1.

Для контролювання безпечності м'ясних харчових продуктів через визначення у їхньому складі нітритів натрію нами застосовано імпедансний метод контролю якості продукції [9]. Концепція імітансного контролю якості продукції неелектричної природи ґрунтується на вимірюваннях параметрів диполісників, якими подаються об'єкти контролю в колі змінного струму. Контроль якості контрольованого продукту за таким методом здійснюється за порівнянням векторів, якими подаються на комплексній площині адмітанси або імпеданси базового та контрольованого зразків. У нашому випадку розглянемо вектори адмітансів. Графічну інтерпретацію векторів адмітансу зображено на рис. 2.

На рис. 2. вектор Y_0 відображає адмітанс базового зразка, а вектор Y_x — адмітанс контрольованого об'єкта на одній фіксованій частоті тестового сигналу. На інших частотах вектори відрізнятимуться іншими параметрами векторів порівняння.

Параметрами порівняння векторів можуть бути модуль адмітансу та фазовий кут або активна та реактивна складові адмітансів контрольованого та базового зразків. За результатами вимірювання аналізують співвідношення виміряних відповідних параметрів зразків.

У нашому випадку інформативними електричними параметрами об'єктів контролю вибрано активну

Таблиця 1. Технологічні показники зразків фаршу яловичого та зі свинини

Table 1. Technological indicators of samples of ground beef and pork

Вид фаршу	pH	Вміст жиру, г на 100 г	Вміст білку, г на 100 г
Яловичий	6,2	15	16
Зі свинини	6,4	35	12

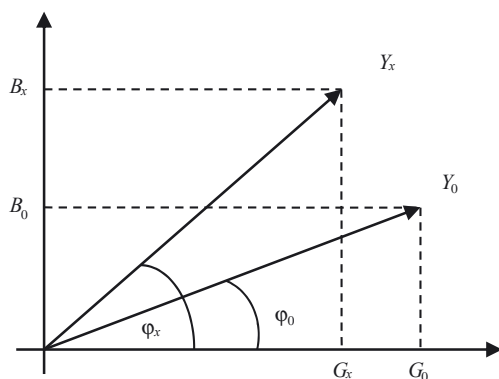


Рис. 2. Графічна інтерпретація складових адмітансу
Fig. 2. Graphical interpretation of the components of the admittance

Y_0 — адмітанс базового зразка;
 Y_x — адмітанс контрольованого об'єкта;
 B_0 — реактивна складова базового зразка;
 B_x — реактивна складова контрольованого об'єкта;
 G_0 — активна складова базового зразка;
 G_x — активна складова контрольованого об'єкта;
 φ_x, φ_0 — фазові кути для контрольованого об'єкта та базового зразка

та реактивну складові провідності (адмітансу) об'єктів порівняння.

У результаті порівнюються значення вимірювань параметрів контрольного зразка фаршу та зразка із додаванням нітриту натрію та оцінюються зміни активних та реактивних складових адмітансу на фіксованих частотах визначеного частотного діапазону синусоїдального тестового сигналу фіксованого рівня.

У такий спосіб визначається відносний показник якості та безпечності продукції, що для імітансного контролю є відношенням між реактивними та активними складовими провідності досліджуваного об'єкта та базового зразка за відсутності їхніх схем заміщення, а саме:

$$\left(\frac{B_{x1}}{B_{01}} \right), \left(\frac{B_{x2}}{B_{02}} \right), \left(\frac{B_{x3}}{B_{03}} \right), \dots, \left(\frac{B_n}{B_{0n}} \right), \quad (1)$$

$$\left(\frac{G_{x1}}{G_{01}} \right), \left(\frac{G_{x2}}{G_{02}} \right), \left(\frac{G_{x3}}{G_{03}} \right), \dots, \left(\frac{G_{xn}}{G_{0n}} \right), \quad (2)$$

де $B_{x1}, B_{x2}, B_{x3}, \dots, B_n$ — реактивні складові адмітансу на окремих частотах; $G_{x1}, G_{x2}, G_{x3}, \dots, G_n$ — активні складові адмітансу на окремих частотах.

Вимірювання складових адмітансу можна здійснювати опосередковано або безпосередньо. Для опосередкованого вимірювання складових (активної та реактивної) імітансу об'єктів порівняння можна скористатися вимірювальними засобами неспеціального призначення за відомими способами [22]. Це потребує різного роду вимірювань (різних засобів) необхідних інформативних параметрів,

а також вимірювальна процедура є тривалою в часі. Для безпосереднього вимірювання складових адмітансу необхідно застосувати серійні вимірювальні засоби спеціального призначення — багаточастотні вимірювачі параметрів імітансу в режимі вимірювання активної та реактивної складових адмітансу.

Результати вимірювань активної та реактивної складових адмітансу за визначених частот відображають графічними залежностями контрольного зразка та м'ясного харчового продукту з додаванням нітриту натрію.

Результати вимірювань складових адмітансу контрольних зразків м'ясних харчових продуктів та зразків з додаванням нітриту натрію можна порівнювати та робити висновки щодо доцільності застосування методу для виявлення нітриту натрію лише у разі забезпечення таких умов:

- первинний перетворювач використовується один і той же;
- рівень тестового синусоїдального сигналу має бути однаковим;
- під'єднання первинного перетворювача проводиться за однаковою схемою;
- умови вимірювань однакові.

Під час досліджень електричних параметрів об'єктів контролю здійснено вимірювання складових адмітансу в частотному діапазоні тестового синусоїдального сигналу сталої амплітуди. Вимірювання складових здійснювалися вимірювачем імітансу на окремих частотах в діапазоні 100 Гц — 100 кГц. Установлено зміни параметрів адмітансу (активної та реактивної складових) від частоти в заданому діапазоні, від об'єкта контролю та від системи «електрод — об'єкт».

У результаті порівнювали значення параметрів контрольного зразка м'ясного харчового продукту та зразка із додаванням нітриту натрію та оцінювали зміни активних та реактивних складових адмітансу на фіксованих частотах визначеного частотного діапазону синусоїдального тестового сигналу фіксованого рівня.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

М'ясні харчові продукти, як найбільш уживані, фальсифікують найчастіше. Якісна фальсифікація м'ясних виробів визначається введенням добавок, заміною одного сорту та виду м'ясної сировини іншим. Фальсифікації можуть широко застосовуватися як у процесі виробництва, так і в процесі реалізації. Найбільш поширеною фальсифікацією м'ясних харчових продуктів є додавання сировини

ни нижчого сорту чи іншого виду, інколи така сировина може втрачати свої якісні характеристики та не відповідати показникам безпечності. За додавання в м'ясні харчові продукти іншої сировини у кількості до 30 % неможливо органолептично відчутти різницю. Щоби не відчувався інший вид сировини додають різні харчові добавки: підсилювачі смаку, регулятори кислотності, фіксатори кольору тощо. А щоби пригнітити та попередити розвиток мікрофлори та збільшити у такий спосіб термін зберігання, додають нітрит натрію.

Для проведення експерименту готували проби фаршу яловичого та зі свинини. Із урахуванням рекомендацій *Codex Alimentarius* щодо дозування хар-

чової добавки Е 250 для м'ясних продуктів додавали нітрит натрію в кількості 0,6 % до маси фаршу. Температура досліджуваних зразків $(22 \pm 0,2)^\circ\text{C}$.

Вимірювання активної та реактивної складових адмітансу зразків фаршів здійснювалися вимірювачем імітансу в режимі вимірювання активної та реактивної складових на фіксованих частотах у діапазоні 100 Гц — 100 кГц.

За отриманими результатами вимірювань побудовано графічні залежності складових адмітансу від частоти для контрольних та базових зразків фаршів (рис. 3, 4).

Аналіз залежностей складових адмітансу для зразків фаршів (рис. 3, 4) засвідчив, що характер кри-

вих, які їх описують, подібний. Разом із тим спостерігаються значні відмінності абсолютних значень між контрольованими (2, 4) та базовими (1, 3) зразками. При цьому криві для реактивних складових контрольованих зразків (зразків з нітритом натрію) на частотах середнього частотного діапазону (1000-10000) Гц мають явно виражені екстремальні значення (максимальні значення).

Криві, які характеризують залежність активних складових адмітансу від частоти контрольованого зразка продуктів порівняно з аналогічними кривими для базового зразка, стрімко зростають із зростанням частоти. Відповідно до цього в частотному діапазоні (5000 — 10000) Гц значення активної складової адмітансу зразка фаршу яловичого з додаванням нітриту натрію збільшується у 2 рази. Для фаршу зі свинини значення зростають в 1,6 разів.

Криві, які характеризують залежність реактивних складових адмітансу від частоти контрольованих продуктів, порівняно з аналогічними кривими для базового зразка, стрімко зростають на середніх частотах. Аналогічно значення реактивної складової зростають

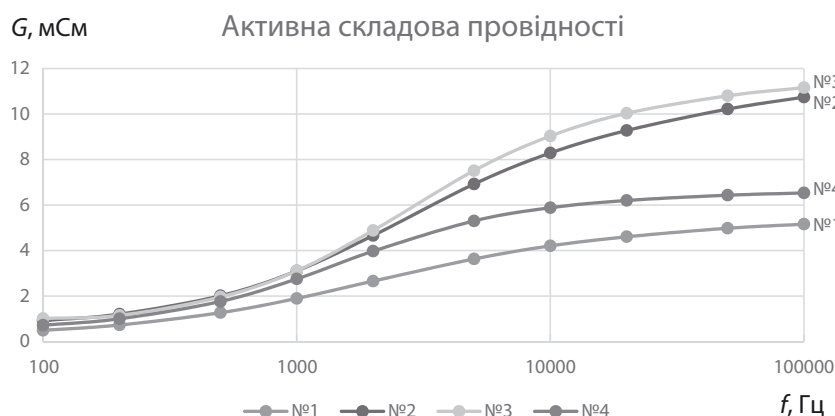


Рис. 3. Залежність активної складової адмітансу від частоти для фаршів яловичого та зі свинини

Fig. 3. Dependence of the active component of admittance on the frequency for ground beef and pork

№1 — контрольний зразок фаршу яловичого, №2 — зразок фаршу яловичого з додаванням нітриту натрію, №3 — зразок фаршу зі свинини з додаванням нітриту натрію, №4 — контрольний зразок фаршу зі свинини

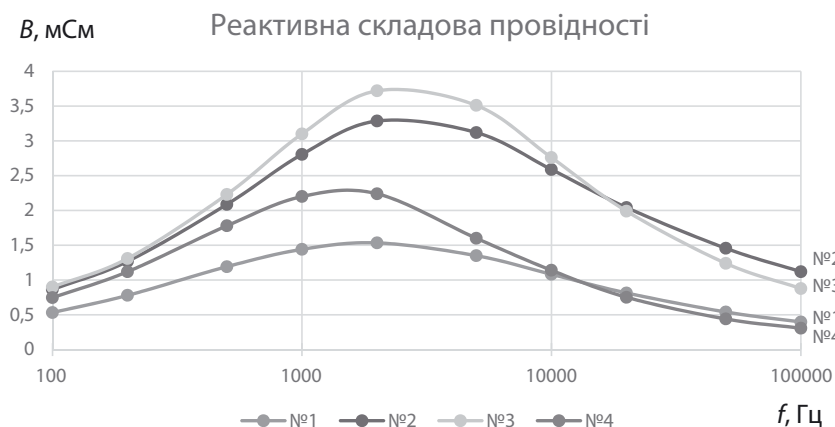


Рис. 4. Залежність реактивної складової адмітансу від частоти для фаршів яловичого та зі свинини

Fig. 4. Dependence of the reactive component of the admittance on the frequency for ground beef and pork

№1 — контрольний зразок фаршу яловичого, №2 — зразок фаршу яловичого з додаванням нітриту натрію, №3 — зразок фаршу зі свинини з додаванням нітриту натрію, №4 — контрольний зразок фаршу зі свинини

у 2 рази для фаршу яловичого (частота 2000 Гц), а для фаршу зі свинини — у 1,7 разів.

Результати дослідження засвідчили суттєві відмінності активних та реактивних складових контрольованого об'єкта з нітритом натрію від базового зразка без нітриту натрію. На основі зазначеного можна вибрати ідентифікаційні ознаки, за якими можна виявляти наявність харчової добавки Е 250. З урахуванням отриманих експериментальних даних залежностей активної та реактивної складової адмітансу від частоти зразків фаршів яловичого та зі свинини треба зазначити таке. Для ідентифікації наявності нітриту натрію у зазначених продуктах необхідно вимірювати активну складову адмітансу контрольованого зразка на вищих частотах (10000 Гц), а реактивну складову — на нижчих частотах діапазону (2000 Гц). Окрім цього, ідентифікаційною ознакою може бути також виявлення наявності екстремального значення реактивної складової в певному частотному діапазоні.

Такі ідентифікаційні ознаки можуть бути покладені в основу розроблення методу ідентифікації нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах.

ВИСНОВКИ

1. Експериментальні дослідження зразків фаршів яловичого та зі свинини з харчовою добавкою і без неї засвідчили можливість застосування імпедансного аналізу для оперативного контролю з метою отримання інформації стосовно наявності нітриту натрію.

Аналіз отриманих залежностей активної та реактивної складових від частоти тестового сигналу вказав на способи ідентифікації продукції з нітритом натрію. Наявність харчової добавки Е 250 в харчових продуктах можна виявити:

- * за зміною амплітудних значень активної складової адмітансу контрольованого зразка на фіксованій частоті певного частотного діапазону;

- * за зміною амплітудних значень реактивної складової адмітансу контрольованого зразка на фіксованій частоті певного частотного діапазону;

- * за характером зміни кривих залежно від визначених діапазонів частот.

2. Значення активної складової адмітансу зразків м'ясних харчових продуктів із додаванням нітриту натрію на кожній частоті від 10000 Гц до 100 кГц більші, ніж значення активних складових у тому ж діапазоні частот для зразків без додавання зазначеної харчової добавки. Така відмінність може бути ідентифікаційною ознакою для якісного визначення наявності нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах за умови дотримання однакових умов вимірювання зразків.

3. Значення реактивної складової адмітансу зразків м'ясних харчових продуктів із додаванням нітриту натрію на кожній частоті від 1000 Гц до 2000 Гц більші, ніж значення активних складових у тому ж діапазоні частот для зразків без додавання зазначеної харчової добавки. Така відмінність може бути ідентифікаційною ознакою для якісного визначення наявності нітриту натрію в харчових продуктах за умови дотримання однакових умов вимірювання.

4. За характером зміни кривих їх залежності від частоти відображають явно виражені екстремальні значення для м'ясних харчових продуктів, які містять харчову добавку. Тобто для фаршів, які містять у своєму складі нітрит натрію, реактивна складова адмітансу зі зростанням частоти до певного значення збільшується, а потім зменшується. Для зразка з м'ясним харчовим продуктом, який не містить Е 250, реактивна складова адмітансу має неявно виражене екстремальне значення в тому ж частотному діапазоні. За такою відмінністю графічних характеристик можна ідентифікувати наявність нітриту натрію в м'ясних харчових продуктах в обмеженому частотному діапазоні.

5. Запропонований спосіб ідентифікації харчової добавки нітрит натрію в м'ясних харчових продуктах дає можливість оперативно виявляти фальсифіковані харчові продукти шляхом використання сировини нижчої якості й підміни, що призводить до втрати або послаблення кольору та можливих збільшень мікробіологічного забруднення, та компенсується додаванням харчової добавки Е 250.

6. За відношенням між складовими можна виявити дози добавки у продукції за наявності зразків з добавками різного рівня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Grossi M., Riccò B. Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2017. № 6. P. 303—325. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.049>.
2. Fasmin F., Srinivasan R. Nonlinear electrochemical impedance spectroscopy // *Journal of The Electrochemical Society*. 2017. 164(7). P. H443-H455. <https://doi.org/10.1149/2.0391707jes>.
3. Detection of pathogenic Bacteria by Electrochemical Impedance Spectroscopy: Influence of the immobilization strategies on the sensor performance / Barreiros dos Santos M., et al // *Procedia Chemistry — Proceedings of the Eurosensors XXIII conference*. 2009.

- № 1. P. 1291—1294. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.322>.
4. Cady P. Progress in impedance measurements in microbiology // *Mechanizing microbiology*. Thomas Publisher, 1978. P. 199—239.
 5. Choi A., Park J.S., Jung, H.I. Solid-medium-integrated impedimetric biosensor for real-time monitoring of microorganisms // *Sensor. Actuat. B-Chem.* 2009. №137(1). P. 357—362. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.12.062>.
 6. Rapid Detection of Microbial Contamination in Frozen Vegetables by Automated Impedance Measurements / Hardy D., et al // *Appl. Environ. Microb.* 1977. №34(1). P. 14—17. <https://doi.org/10.1128/AEM.34.1.14-17.1977>.
 7. Ultra Low-Power Smart Medical Sensor Node for In-Body Biomonitoring / Alonso-Arce M., et al // *IEEE 15th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)*. 2013. P. 491—496. <https://doi.org/10.1109/HealthCom.2013.6720726>.
 8. Bogonez P., Riu P.J. Implantable bioimpedance system for measuring impedance of kidney // *Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Bioimpedance and the 8th Conference on Electrical Impedance Tomography Berlin Heidelberg: Springer*. 2017. P. 256—259. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73841-1_68.
 9. Походило Є.В., Столярчук П.Г. Імітаційний контроль якості: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки (Pokhodylo E.V., Stolyarchuk P.G. Imitation quality control: a monograph. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House), 2012. 164 с/р.
 10. Применение метода импедансной спектроскопии при оценке качества мясного сырья / Алейников А.Ф., и др. // *Информационные технологии, системы и приборы в АПК. Ч. 1: Материалы 5-ой международной научно-практической конференции «АГРОИНФО-2012», 10-11 октября 2012 г. Новосибирск (Application of the method of impedance spectrometry in assessing the quality of raw meat / Aleinikov A.F., etc. // Information technologies, systems and devices in agriculture. Part 1: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «AGROINFO-2012», October 10—11, 2012 Novosibirsk)*. 2012. С/Р. 167—174.
 11. Щербентовська О.М. Визначення свіжості курячого м'яса методом імпедансної спектроскопії // *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького (Schebentovska A.M. Determination of freshness of chicken meat by impedance spectroscopy // Scientific Bulletin of LNUVMBT named after SZ Gzhitsky)*. 2011. Т. 13, вип. 4(4). С/Р. 352—358.
 12. Походило Є., Вікович О. Контроль свіжості м'яса за параметрами імітації // *Стандартизація. Сертифікація. Якість (Pokhodylo E., Vikovych O. Control of freshness of meat by parameters of imitation // Standardization. Certification. Quality)*. 2014. № 1(86). С/Р. 45—48.
 13. Chanet M., Riviere C., Eynard P. Electric impedance spectrometry for the control of manufacturing process of comminuted meat products // *J. Food Eng.* 1999. № 42. P. 153—159.
 14. Bauchot A.D., Harker F.R., Arnold W.M. The use of electrical impedance spectroscopy to assess the physiological condition of kiwifruit // *Postharvest Biol. Tec.* 2000. №18(1). P. 9—18. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00113-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00113-2).
 15. Bhatt C.M., Nagaraju J. Non-destructive method to estimate the moisture content in bread using multi-channel electrical impedance spectroscopy // *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, New Orleans, LA, USA, 17–19 February, 2009. P. 55—60. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12387>.
 16. Automatic ice-cream characterization by impedance measurements for optimal machine setting / Grossi M., et al // *Measurement* 2012. № 45 (7). P. 1747–1754. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.04.009>.
 17. Fast and Accurate Determination of Olive Oil Acidity by Electrochemical Impedance Spectroscopy / Grossi M., et al // *IEEE Sensors Journal*. 2014. № 14(9). P. 2947—2954. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2321323>.
 18. M Slyva Yu.V., Pokhodylo E.V. Application of the impedance method for determination of monosodium glutamate in food products // *Food science and technology*. 2020. Vol. 14, Issue 2. P. 66—76 DOI: <https://doi.org/10.15673/fst.v14i2.1720>
 19. CODEX STAN 192-1995 General Standard for Food Additives. 479p. // http://www.fao.org/gsfaonline/docs/CXS_192e.pdf
 20. Вплив нітратів на здоров'я людини / Совгіра С.В. // І-й Всеукраїнський з'їзд екологів: міжнар. наук.-техн. конф.: тези допов (Influence of nitrates on human health / Sovgira S.V. // 1st All-Ukrainian Congress of Ecologists: International. scientific and technical conf.: these additions). — С/Р. 269.
 21. ДСТУ ENV 12014-3:2003 Продукти харчові. Визначення вмісту нітрату і (або) нітриту. Частина 3. Спектрометричне визначення вмісту нітрату та нітриту в м'ясних продуктах після ферментативного відновлювання нітрату до нітриту (ENV 12014-3:1998, IDT)] (DSTU ENV 12014-3: 2003 Food products. Determination of nitrate and (or) nitrite content. Part 3. Spectrometric determination of nitrate and nitrite content in meat products after enzymatic reduction of nitrate to nitrite (ENV 12014-3: 1998, IDT)]).
 22. ДСТУ ENV 12014-4:2003 Продукти харчові. Визначення вмісту нітрату і (або) нітриту. Частина 4. Метод іонообмінної хроматографії (ІХ) для визначення вмісту нітрату та нітриту в м'ясних продуктах (ENV 12014-4:1998, IDT) (DSTU ENV 12014-4: 2003 Food products. Determination of nitrate and (or) nitrite content. Part 4. Ion exchange chromatography (IX) method for determination of nitrate and nitrite content in meat products (ENV 12014-4: 1998, IDT)).

Отримано / received: 19.02.2021.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Л.М. Хомічаком,

Інститут продовольчих ресурсів НААН України.

Prof. L.M. Khomichak, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.57-64

УДК 546.821.824:66.094:539.219.1

АНАЛІЗ ГІДРИДУ ТИТАНУ НА ВМІСТ ГІДРОГЕНУ ТА ДОМІШОК ОКСИГЕНУ, НІТРОГЕНУ, КАРБОНУ

Analysis of titanium hydride on hydrogen and admixtures oxygen, nitrogen, carbon contents

М. М. Калинюк, кандидат технічних наук,
завідувач лабораторії газового аналізу,
e-mail: Mykkal@ukr.net

Р. В. Козін, науковий співробітник,
Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України, Київ,
e-mail: kozinrv@gmail.com

О. М. Калинюк, кандидат технічних наук,
головний інженер,
ТОВ «Стратегія БМ», Київ, Україна,

О. Л. Пузрін, молодший науковий співробітник,
e-mail: procesor1@ukr.net

І. А. Моссоковська, Кандидат філософських наук,
старший науковий співробітник відділу,
Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

М. М. Kalyniuk, candidate of technical sciences,
head of the gas analysis laboratory,
e-mail: Mykkal@ukr.net

R. V. Kozin, researcher,
Institute of Electric Welding
named after Є.O. Paton NAS of Ukraine, Kyiv,
e-mail: kozinrv@gmail.com

A. M. Kalyniuk, candidate of technical sciences,
chief engineer,
BM Strategy LLC, Kyiv, Ukraine,

A. L. Puzrin, junior researcher,
e-mail: procesor1@ukr.net

I. A. Mossokovska, candidate of philosophical sciences,
senior research fellow,
Institute of Electric Welding named after Є.O. Paton
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Представлено літературний огляд методів виготовлення, дослідження, застосування гідриду титану та визначення вмісту гідрогену та домішок оксигену, нітрогену, карбону в цій сполуці.

Результати аналізів гідридів титану на вміст «понадстехіометричного» гідрогену не можна вважати достовірними. Експерименти зі створення «понадстехіометричного» гідриду титану необхідно дуже ретельно готувати.

Розроблено методику ступінчастого визначення вмісту домішок оксигену та нітрогену в гідриді титану та аналізу гідриду титану на вміст гідрогену.

Видалення газової фази та частини адсорбованого шару з гідриду титану дозволяє зменшити кількість домішок оксигену та нітрогену в ~4 рази.

Literature review on methods of manufacture, investigation and application of titanium hydride and determination of hydrogen and admixtures of oxygen and nitrogen contents in this compound.

Results of analyses titanium hydrides on «overstehiometric» hydrogen contents cannot consider as reliable. It is necessary to prepare experiments for creation of «overstehiometric» titanium hydrides.

Method of stepped determination on admixtures of oxygen and nitrogen in titanium hydride and analyses of titanium hydride on hydrogen content.

Removal of gas phase and part of adsorbed layer from titanium hydride makes it possible to decrease contents of oxygen and nitrogen admixtures ~4 times.

Ключові слова: гідрид, титан, гідроген, оксиген, нітроген, карбон, визначення.

Keywords: hydride, titanium, hydrogen, oxygen, nitrogen, carbon, determination.

Широкого застосування в авіації, космічній техніці, машинобудуванні, хімічній промисловості, медицині, оборонній сфері отримують титанові сплави, оскільки вони сполучають у собі високі пластичні характеристики, питому міцність і корозійну стійкість [1—4].

За екстремальних умов експлуатації (захисні броньовані покриття, високоміцні деталі, які працюють за підвищеного зношення, та інш.) потріб-

ні показники міцності, твердості та зносостійкості за достатньо високих характеристик пластичності та тріщиностійкості. Технології порошкової металургії дозволяють створити такі матеріали — 2, 3 шарові структури. Вони складаються зі сплаву Ti — 6Al — 4V з порошками (5...10) % TiB або TiC. Їх отримують методами пресування та спікання багатокомпонентних сумішей. Шари виробляють із сумішей на основі гідратованого порошку титану

(гідриду титану) з додатками порошкової лігатури [3]. Порошок гідриду титану використовують як основу сумішей, ураховуючи його перевагу з точки зору активації спікання порошків та їхнього очищення водородом від домішок. Пресування та спікання з одночасним видаленням водороду створюють у масиві металу мікроструктуру однорідного матеріалу в кожному шарі при достатній адгезії між ними. Важлива умова — видалення водороду в процесі вакуумного спікання ($< 0,01$ % мас.), щоб уникнути проявлення водородної крихкості [1—4].

У роботі [8] наведено огляд літератури з виробництва, застосування, дослідження фізико-хімічних властивостей гідридів титану та інших перехідних металів 4A та 5A груп періодичної системи елементів. Автори багатьох робіт підкреслюють вплив домішок кисню, нітрогену, карбону на вміст водороду в гідриді титану. Реакція гідридування (дегідридування) дуже чутлива до чистоти металу. Наявність у поверхневих шарах порошкового титану оксидних, нітридних, карбідних плівок створює труднощі для гідридування [7—24].

Забруднення в об'ємі металу (кисень, карбон, нітроген), характер поверхонь, умови тепло — та масообміну й інші характеристики гідриду титану суттєво впливають на термодинаміку й кінетику поглинання водороду, на стабілізацію та положення кордонів областей існування фаз у системі «титан — водород» [12, 13].

Для встановлення складу гідридних комплексів у перехідних металах недостатньо аналізувати вміст водороду. Необхідне визначення вмістів інших елементів (кисню, нітрогену, карбону та інш.) [9—14].

Автори [15] працювали з порошком титану (Ti — 98,5 % мас., N — 0,04 % мас.) та кованим титаном (Ti — (98,2...99,9) % мас., N — 0,08 % мас.), але чистоти газоподібного водороду та наявності й кількості домішок кисню та карбону в гідриді титану не вказали. Наявність навіть тонких окисних плівок на поверхні титану різко знижує швидкість поглинання водороду. Максимального вмісту водороду, який відповідає формулі TiH_2 , досягнуто не було, оскільки в титані були домішки, але не вказано які. Автори висловлювали сумніви щодо можливості отримати сполуку типу TiH_2 .

Автори [16] використали титан трьох сортів: А (98,58 % мас.), Б (99,73 % мас.), В (99,03 % мас.), — але не надали чистоти газоподібного водороду та наявності домішок кисню, нітрогену, карбону в титановому порошок і гідриді титану. Сліди кисню та нітрогену в металі значно впли-

вають на рівноважний тиск водороду та на його характер поглинання і зменшують вміст водороду. Забруднення, які присутні в порошок титану, гальмують створення гідриду титану.

Автори [17] досліджували розчинність водороду в титані за температур, близьких до $T_{пл}$, і тиску до 50 МПа методом рівноважного насичення та гартування металу з наступною вакуумною екстракцією водороду. Вони використали гелій після очищення порошками цирконію та титану, нагрітими до (500...1000) °C, та водород, який пройшов через паладієвий фільтр. Вони побудували діаграму стану титан—водород. Але вони нічого не пишуть стосовно створення гідриду титану.

Автори [18] вивчали методом Сивертса термодинамічні властивості в системі Ti — H_2 за тиску ~ 7 МПа. Початковий порошок титану — 99,99 % мас. Ti, 0,0067 % мас. Fe, 0,0011 % мас. Ni. Вмісти у ньому домішок кисню, нітрогену, карбону не вказані. Газоподібний водород має вміст кисню 5×10^{-6} % мас. Автори не визначили такої фази, як TiH_2 . Вони допустили можливість існування понадстехіометричного вмісту водороду в гідриді титану.

Автори [5] досліджували особливості створення фаз за контрольованого гідридування та дегідридування титану двома методами:

1. Гідридування титанової губки методом пічного нагрівання в атмосфері водороду.

2. Високотемпературний синтез, що сам розповсюджується (ВСС).

Вміст водороду в гідридах титану вони визначали методом рентгенівської дифракції на рівні (1,8...4,2) % мас. Автори визначили вміст кисню в зразках титанової губки — (0,21...0,28) % мас. Склад домішок на поверхнях гідридів вивчено методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії. На поверхнях частинок титанової губки під час гідридування присутні домішки кисню, нітрогену, карбону, хлору, магнію, кальцію. Але основна домішка на поверхні — це кисень, який грає важливу роль у формуванні фізико-механічних властивостей гідридів. Для збереження кількості атмосферних домішок, зокрема кисню, у гідриді титану на прийнятному рівні ($\sim 0,2$ % мас.) необхідно зменшити вміст домішок у початкових матеріалах.

Автори [6] досліджували вплив умов синтезу гідридів титану гідридуванням титанової губки методом ВСС на створення фаз та їхніх структур. Вони використали титанову губку чистотою $\sim 99,67$ % мас. та газоподібний водород ($\sim 99,99$ % мас.). Синтез гідриду титану заданого складу проводили в закритому реакторі. Автори ставили своїм завданням

отримання та вивчення гідриду титану із вмістом гідрогену нестехіометричного TiH_x ($x < 1,5$) та стехіометричного TiH_2 , який отримували з періодичною подачею гідрогену в реактор у процесі горіння. Для отримання TiH_2 , за розрахунком, потрібен тиск гідрогену > 100 атм. Вміст гідрогену визначали двома методами: ваговим (збільшення ваги за гідрирування) та хімічним (відновлювальне плавлення проби в потоці інертного газу з наступним хроматографічним аналізуванням газів).

Автори [25] аналізували гідрид титану на вміст гідрогену методом термічного розкладання у вакуумі з наступною десорбцією та вимірюванням тиску гідрогену, що виділяється. Вміст гідрогену в гідриді титану — (2,33...3,25) % мас. За наявності домішок кисню, нітрогену, карбону та інш. не повідомляється.

Автори [26] визначали вміст гідрогену в гідриді титану методом високочастотного нагрівання аналітичного зразка в графітовому тиглі в потоці азоту. Гідроген, що виділяється з наважки, окислюють до H_2O . Кількість вологи вимірюють методом Фішера з волюмометричним титруванням. Вміст гідрогену в гідридах титану — (0,7...3,3) % мас.

У роботі [27] методом відновлювального плавлення аналітичного зразка в графітовому тиглі в потоці газу-носія визначено вміст гідрогену в гідриді титану на рівні (3,99...4,02) % мас. Цей гідрид використано в роботах [28, 29] для розроблення методик визначення вмістів кисню та нітрогену в гідриді титану. Але автори [27—29] не зазначили, скільки ці гідриди вміщали домішок кисню, нітрогену, карбону та за якими стандартами калібрували аналізатори.

У роботі [30] розроблено рентгенографічний метод визначення гідрогену в гідриді титану. Автори не наводять ніяких цифрових даних з методики аналізування та чистоти матеріалів, з якими вони працювали, але визначили вміст гідрогену в гідриді титану на рівні ~3,5 % мас.

Автори роботи [31] запропонували метод протонного магнітного резонансу для визначення вмісту гідрогену в гідриді титану та дегідратованих титанових порошках. Вони визначили максимальний вміст гідрогену на рівні 3,66 % мас., але не навели ніяких даних з методики аналізування та чистоти матеріалів, з якими вони працювали.

Дифузійно-гравіметричний метод визначення вмісту гідрогену в гідридах запропоновано в роботі [32]. Але автори цієї роботи не написали, з якими гідридами вони працювали та не навели жодної цифри ні з методики аналізування, ні з вмісту гідрогену в гідриді титану.

Автори [19] описали експресний метод імпульсного нагрівання для визначення вмісту кисню в продуктах гідрирування титанових матеріалів. Вони показали перерозподіл домішок кисню в процесі отримання титанових порошків методом гідрирування — дегідрирування. Домішки кисню перешкоджають розкладанню гідриду та погіршують якість кінцевого продукту (титанового порошку). У процесі розмолу гідриду титану на повітрі відбувається насичення його киснем. Під час наступного дегідрирування цей кисень повністю переходить у готовий продукт (порошок титану) та різко погіршує його якість. Автори надають рекомендації для отримання титанових порошків методом гідрирування — дегідрирування.

З огляду літератури [1—32] можна зробити такі **висновки**:

1. Домішки кисню, нітрогену, карбону впливають на термодинаміку та кінетику поглинання (видалення) гідрогену титаном, а також на вміст гідрогену в гідриді титану.

2. Автори не надали повної інформації щодо наявності домішок у початкових та кінцевих матеріалах (гідриді титану, газоподібному гідрогені, титані), а також з методик аналізування гідридів титану на вміст гідрогену.

3. Автори не аналізують вміст газових домішок (кисню, нітрогену, карбону) у гідриді титану,

Табл.1. Вміст гідрогену та домішок кисню, нітрогену, карбону в гідридах титану

Tabl.1. Hydrogen content and oxygen, nitrogen, carbon admixtures in titanium hydrides

Гідрид	Вміст домішок, % мас.							Вміст гідрогену, % мас.	
	Кисень		Нітроген		Карбон				
	[8]	Ця робота*	[8]	Ця робота*	[8]	Ця робота*	[8]	Ця робота*	
TiH_x	1	0,40	$0,42 \pm 0,03$	0,31	$0,30 \pm 0,03$	$\leq 0,030$	$0,027 \pm 0,004$	$3,81 \pm 0,11$	$3,80 \pm 0,12$
	2	0,67	$0,67 \pm 0,06$	0,57	$0,56 \pm 0,05$	0,075	$0,077 \pm 0,005$	$3,60 \pm 0,13$	$3,60 \pm 0,10$
	3	0,96	$0,95 \pm 0,08$	0,78	$0,79 \pm 0,05$	0,190	$0,195 \pm 0,009$	$2,90 \pm 0,15$	$2,84 \pm 0,11$

* — Середнє з 3...4 паралельних визначень

враховуючи різні форми їхнього існування в цьому матеріалі.

4. Існує проблема створення понадстехіометричних гідридів титану.

Матеріали та прилади, використані в цій роботі:

1. Гідриди, використані в цій роботі (табл. 1).
2. Гідрид титану, вироблений у ЗТМК (Запоріжжя, Україна), — 3,60 % мас. гідрогену.

3. Тиглі графітові фірми *LECO*:
кисень, нітроген (зовнішній № 775—433, внутрішній №775 — 431),
гідроген № 769—520.

4. Стандартні зразки титанових сплавів з відомими вмістами кисню, нітрогену, гідрогену, карбону:

УкрНДІспецсталь

а. *RM CA015a* ($O = 0,069 \pm 0,009$, $N = 0,0069 \pm 0,0013$, $H = 0,0017 \pm 0,0003$ % мас.),

б. *DSTU CA017* ($O = 0,151 \pm 0,003$, $N = 0,0061 \pm 0,0006$, $H = 0,0039 \pm 0,0004$ % мас.),

в. *CRM CA018* ($O = 0,058 \pm 0,004$, $N = 0,0130 \pm 0,0012$, $H = 0,0015 \pm 0,0002$ % мас.).

Фірма LECO

№ 502 — 888 ($O = 0,354 \pm 0,005$, $N = 0,0060 \pm 0,0007$, $H = 0,0027 \pm 0,0004$, $C = 0,049 \pm 0,004$ % мас.).

5. Олов'яні капсули № 501 — 059 фірми *LECO*.

6. Нікелеві капсули № 502 — 344, корзинки № 763 — 065, флюс 501 — 598 фірми *LECO*.

7. Аналізатори *TC 436* (кисень, нітроген), *RH 402* (гідроген), *C400* (карбон), *CHN 600* (гідроген, карбон, нітроген) фірми *LECO*.

Підготування проб і аналітичних зразків гідриду титану, калібрування аналізаторів детально описано в роботі [8]. Схему розміщення аналітичних зразків у капсулах наведено на рис. 1. Олов'яні

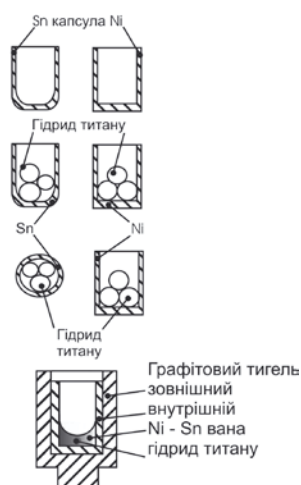


Рис. 1 Схема підготування аналітичного зразка гідриду титану до аналізу
Fig. 1. The diagram of preparation of the titanium hydride for analysis

капсули використовували для рутинних аналізів, а нікелеві — для ступінчастого аналізу. Особливу увагу ми звернули на точність зважування аналітичних зразків у капсулах. Були використані ваги *Sartorius H51* з точністю вимірювання $\pm 0,00005$ г.

Було перевірено калібрування аналізаторів *TC 436*, *RH 402*, *C400*, *CHN 600* за температурою нагрівання тиглів та стандартними зразками з відомими вмістами домішок кисню, нітрогену, гідрогену та карбону [8, 23]. Гідрид титану, вироблений у ЗТМК (Запоріжжя, Україна), із вмістом гідрогену 3,60 % мас., був використаний для калібрування аналізатора *RH 402*. Аналізатор *CHN 600* калібрували за стандартним зразком № 501—441 (цукор з вмістом $C = 42,10$ % мас., $H = 6,48$ % мас.) фірми *LECO* [8] та гідридом титану з вмістом гідрогену 3,60 % мас.

На рис. 2 наведено схему розподілу домішок кисню, нітрогену, гідрогену та карбону в гідриді титану. Газові домішки розподілені на три фази:

1. Газова фаза (повітря, домішки CO , CO_2 , H_2O , H_2 та інш.) розміщена у просторах між частинками гідриду титану;

2. Гази, адсорбовані поверхнями частинок гідриду титану:

а. фізично адсорбовані — утворення на поверхнях частинок гідриду титану плівок товщиною в одну або декілька молекул. Процес, зворотній за зміною температури та (або) тиску. Ці плівки можна видалити з поверхонь частинок внаслідок вакуумування (або продування чистими гелієм чи аргонном) та підвищення температури нагрівання порошку гідриду титану;

б. хемосорбовані гази — утворення валентних зв'язків між газами, що адсорбуються, з металом. Процес має тенденцію до незворотності (особливо за температурою).

3. Хімічні сполуки (оксиди, нітриди, карбіди та інш.).

Вміст карбону в гідридах титану визначали на аналізаторах *C400* та *CHN600*. На рис. 3 наведено

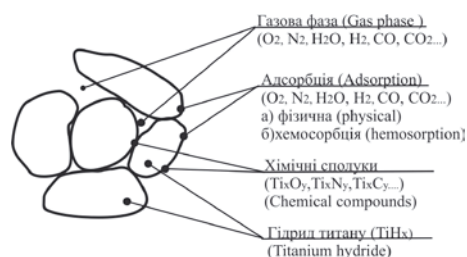


Рис.2 Схема розподілу домішок кисню, нітрогену, гідрогену та карбону в гідриді титану
Fig. 2 The diagram of distribution of oxygen, nitrogen, hydrogen and carbon admixtures in titanium hydride

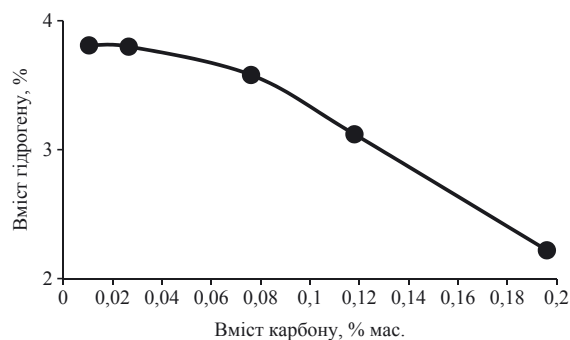


Рис. 3. Залежність вмісту гідрогену в гідриді титану від вмісту вуглецю

— [8], • — ця робота

Fig. 3. Dependence of hydrogen content in titanium hydride from carbon content

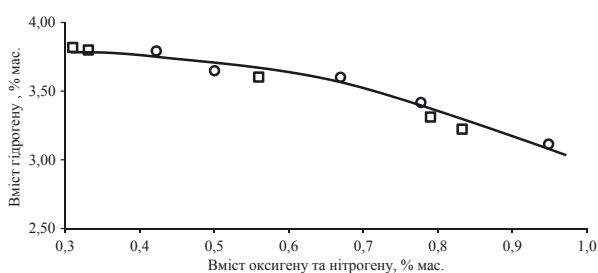


Рис. 4. Залежність вмісту гідрогену в гідриді титану від вмісту кисню та нітрогену.

— [8], ○ — кисень, □ — нітроген — ця робота

Fig. 4. Dependence of hydrogen content in titanium hydride from oxygen and nitrogen contents

результати цих аналізів порівняно з результатами роботи [8]. Методика визначення вмісту карбону в гідридах титану на приладі C400 наведена в роботах [36, 37].

Нами було вирішено дослідити, чи можна зменшити вмісти кисню та нітрогену в гідриді титану за його термічного оброблення.

У роботі [8] визначено вплив домішок кисню та нітрогену на вміст гідрогену в гідриді титану. Ми перевірили ці висновки. На рис. 4 наведено результати цих порівнянь. Для подальших досліджень ми вибрали три гідриди титану (№ 1, 3, 5) [8] (табл. 1, 2).

На рис. 5 наведено циклограму визначення вмістів кисню та нітрогену в гідриді титану ступінчастим методом на аналізаторі TC436. Аналітичний зразок, який розміщено в нікелевій або олов'яній капсулі, надходить зі шлюзу в графітовий тигель (рис. 1). Нагрівання тигля проводили автоматично згідно з програмою.

Аналізування порожніх тиглів на вміст кисню та нітрогену дало такі результати: O — $(5...10) \times 10^{-4}$ % мас., N — $(2...6) \times 10^{-4}$ % мас.

У Ni — та Sn — капсулах вміст O — $(5...10) \times 10^{-4}$ % мас., N — $(3...5) \times 10^{-4}$ % мас.

У табл. 2 наведено результати визначення вмістів кисню та нітрогену в гідриді титану (згідно з рис. 5).

Видалення газової фази (табл. 2а, в) дозволяє знизити вміст кисню та нітрогену в гідриді титану ~ в 3,0 рази.

Видалення газової та частини адсорбованої фаз (табл. 2б, в) дозволяє знизити вміст кисню та нітрогену в гідриді титану ~ в 4 рази.

У режимі аналізування, вказаному в табл. 2 (а, б, в), зменшення вмісту кисню та нітрогену складає ~ 4 рази.

Отже, є принципова можливість зменшити кількість домішок кисню та нітрогену на етапі приготування багатокомпонентних сумішей до пресування та спікання шарів гідратованого порошку титану (гідриду титану) з додатками лігатури TiB та (або) TiC [1—4]. Це може поліпшити технічні характеристики таких матеріалів.

Кількості гідрогену в гідридах титану, визначені в роботах [5, 6, 8, 15—19, 25—32], коливаються в межах $(1,8...4,0)$ % мас. Таке можна пояснити тим, що автори цих робіт вирішували різні завдання з використанням початкових матеріалів різної якості та різноманітного дослідницького обладнання.

Ми визначали вміст гідрогену в гідридах титану на приладах CHN600 та RH402. Методики практично не відрізнялися від тих, що були використані в роботі [8]. Труднощі проведення аналізів гідриду титану на вміст гідрогену на приладі RH402 пов'язані з обмеженням маси аналітичного зразка. Велика

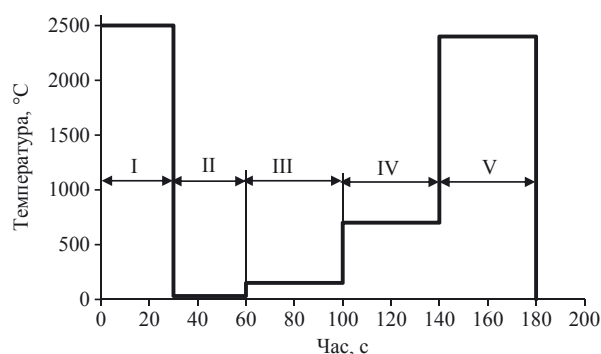


Рис. 5. Циклограма визначення вмістів кисню та нітрогену в гідриді титану

I — дегазування графітового тигля $\sim 2500^\circ\text{C}$, ~ 30 с.
II — охолодження графітового тигля та завантаження аналітичного зразка в шлюз $\sim 20^\circ\text{C}$, ~ 30 с.
III — видалення газової фази (рис. 1) $\sim 150^\circ\text{C}$, ~ 40 с.
IV — видалення адсорбованої фази (рис. 1) та дегідрогенізація $\sim 700^\circ\text{C}$, ~ 40 с.
V — аналізування (адсорбція, хемосорбція, хімічні сполуки) (рис. 1) $\sim 2400^\circ\text{C}$, ~ 40 с.

Fig. 5. Cyclogram of the determination of oxygen and nitrogen in titanium hydride

Табл. 2 Вміст кисню, нітрогену, гідрогену, карбону в гідридах титану

Tabl.2. Oxygen, nitrogen, hydrogen, carbon contents in titanium hydrides

Зразок *	Режим**	Вміст, % мас. ***			
		Оксиген	Нітроген	Гідроген	Карбон
TiH _x № 1	в	0,42 ± 0,03	0,30 ± 0,03	3,80 ± 0,12	0,027 ± 0,004
	а	0,0003	0,0003	Не визначали	Не визначали
	в	0,131 ± 0,005	0,114 ± 0,004		
	б	0,002	0,0089		
	в	0,122 ± 0,006	0,067 ± 0,005		
	а	0,0003	0,0004		
	б	0,005	0,0077		
	в	0,115 ± 0,005	0,063 ± 0,005		
TiH _x № 3	в	0,67 ± 0,06	0,56 ± 0,05	3,60 ± 0,10	0,077 ± 0,005
	а	0,0005	0,0027	Не визначали	Не визначали
	в	0,32 ± 0,05	0,16 ± 0,05		
	б	0,008	0,009		
	в	0,22 ± 0,05	0,14 ± 0,04		
	а	0,0005	0,0027		
	б	0,007	0,0070		
	в	0,20 ± 0,03	0,13 ± 0,05		
TiH _x № 5	в	0,95 ± 0,08	0,79 ± 0,05	2,84 ± 0,11	0,195 ± 0,009
	а	0,0004	0,0044	Не визначали	Не визначали
	в	0,58 ± 0,06	0,21 ± 0,05		
	б	0,007	0,0080		
	в	0,32 ± 0,05	0,19 ± 0,05		
	а	0,0005	0,0052		
	б	0,006	0,0080		
	в	0,28 ± 0,06	0,19 ± 0,05		

* Гідриди титану, які досліджували в роботі [8]

** а) Видалення газової та фізично адсорбованої фаз (рис. 1) ~150 °C, ~40 с

б) Видалення хемосорбованої фази (рис. 1) та дегідрогенізація ~700 °C, ~40 с

в) Аналізування ~2400 °C ~40 с

*** Середні величини з 3...4 паралельних визначень

кількість гідрогену в гідриді титану вимагає зменшення маси аналітичного зразка до меншого від 0,01 г.

Автори робіт [5, 6, 18], вивчаючи розчинність гідрогену в титані методом Сівертса [18] та процеси гідрогенізації — дегідрогенізації титанової губки [5, 6], допустили можливість створення гідридів титану з понадстехіометричним вмістом гідрогену. Ці дослідження виконано в закритому об'ємі (реактор [5, 6], камера [18]). Тобто, об'єм — постійний, а тиск гідрогену — змінна складова. Автори додавали гідроген у закритий об'єм до встановлення постійного мінімального тиску в реакторі (камері). Але вони не врахували деяких факторів:

1. У початкових та кінцевих матеріалах (титановій губці та гідриді титану) не вказано ні наявності, ні кількості домішок кисню, нітрогену, карбону, які впливають на процес поглинання (видалення) гідрогену титаном.

2. Автори вимірювали загальний тиск у реакторі (камері), вважаючи, що в об'ємі міститься тільки

гідроген. Але атмосфера в камері (реакторі) включає не тільки гідроген, а й пари води, магнію, кальцію, хлору, залишки повітря та інш. Автори мали справу з газовою сумішшю. Автори [5] пишуть, що потрібно вимірювати парціальний тиск гідрогену, але міряли загальний тиск. Автори [5, 6, 18] взагалі не контролювали складів газових сумішей.

3. Автори не врахували під час гідридування титанової губки такого явища, як термічна дифузія [41]. Під впливом температурного градієнта газова суміш розділяється. Найбільш легкі компоненти газової суміші (гідроген) концентруються в найгарячіших, а важкі — у холодніших частинах камери (реактора). Ступінь розділення зростає з підвищенням температурного градієнта та різниці в молекулярних масах газів, які входять до складу газової суміші. Нехтування термічною дифузією газів за ви-

вчення хімічних рівноваг може внести серйозні помилки в результати досліджень [41].

4. Зважування титанової губки. Автори [5] підкреслили, що визначені ними концентрації гідрогену, які вищі за стехіометричні, пов'язані, скоріш за все, з похибками зважування металу для гідридування у конкретному випадку ($X = 2,09$ у TiH_x). Але вони не вказали мас зразків, з якими працювали. У роботі [6] для насичення титанової губки гідрогеном використані зразки масою (10...20) г, а у роботі [18] — масою ~1 г. Але які маси аналітичних зразків невідомо. Автори [6, 18] не визначали похибок зважування зразків титанової губки.

5. Вимірювання об'єму. У роботі [5] не вказано, якого об'єму реактор було використано. Автори [6] проводили експерименти в реакторі об'ємом ~2 л, а в роботі [18] використали камеру об'ємом ~5 см³. Для робіт [5, 6] об'єм — некритичний параметр, а для роботи [18] визначення «гарячого» об'єму камери є дуже важливим, навіть критичним. Точне

визначення величини «гарячого» об'єму — це найбільш вразливе місце методу Сівертса, який було використано в роботі [18]. «Гарячим» об'ємом камери за визначеної температури вважають ту кількість газу за нормальних умов, яка потрібна для заповнення її, за встановленим тепловим режимом у всій камері та тиску 1 атм (760 мм рт. ст.). Для визначення «гарячого» об'єму звичайно використовують газ, інертні по відношенню до металів, та технічні характеристики яких близькі до гідрогену (зазвичай, це — гелій). Величина «гарячого» об'єму залежить від конструкції камери, маси та температури металу, теплофізичних властивостей газів й інш.

6. Вимірювання температури. У роботах [5, 6] не вказано, як вимірювали температуру металу та в якому місці. У роботі [18] контроль температури металу є обов'язковою процедурою — складовою частиною методу Сівертса.

7. Визначення вмісту гідрогену в гідриді титану. У роботі [5] визначали фазові склади гідридів титану після різних режимів гідридування, які залежать від концентрації гідрогену. Для визначення цих складів використали метод рентгенівської дифракції на приладі ДРОН — 3М. Це неточний і не дуже інформативний метод для визначення вмісту гідрогену. Невідомо, як і чим автори [5] калібрували свій метод. У роботі [6], окрім указаних вище, були термінологічні помилки: ваговий метод — це не окремий, а один із різновидів хімічного методу, а відновлювальне плавлення — це не хімічний, а фізико — хімічний метод [38—40]. Автори [6] написали, що кількість гідрогену, яку поглинає титанова губка, може досягати величин, які вищі за стехіометричні ($TiH_{2,25}$ та $TiH_{2,33}$). Вони не надали жодної інформації, на яких приладах виконували аналізи та за якими методиками. А там можливі серйозні помилки (процедура зважування, маси аналітичних наважок, аналітичні характеристики приладів та їхнє калібрування та інш.) [8, 38—40]. У методі Сівертса [18] вміст гідрогену визначено за постійної температури внаслідок зменшення тиску в камері до постійного протягом однієї години. Вміст гідрогену в металі визначали, враховуючи температуру металу, початковий та кінцевий тиск у камері, гарячий об'єм, масу металу. Вимірювань TiH_x , де $x > 2$, не здійснювали, а за допомогою квазіхімічної моделі статистичної механіки розраховували фази $TiH_{2,35}$ та $TiH_{2,12}$.

Результати [5, 6, 18] з отримання понадстехіометричних гідридів не можна вважати переконливими. Швидше, це — тільки припущення.

Ситуація зі створення «понадстехіометричного» гідриду титану нагадує історію з дослідження роз-

чинності гідрогену в паладії. У 1910 та 1914 роках автори [33, 34] визначили, що за $T_{пл}$ рідкий паладій розчиняє гідроген у ~1,8 рази менше, ніж твердий. Для всіх металів за $T_{пл}$ рідкий метал розчиняє гідроген в (2...3) рази більше, ніж твердий (для Al ~19). Майже 70 років ніхто не звертав уваги, що автори [33, 34] самі сумнівалися у своїх висновках. Наступні дослідники тільки передруковували рисунки з робіт [33, 34], не звертаючи уваги на застереги цих авторів. У 1980 р. опубліковано статтю [35], у якій доведено, що за $T_{пл}$ рідкий Pd розчиняє у 2,2 рази більше гідрогену, ніж твердий. Тобто все стало на свої місця.

Ми змоделювали можливість отримання понадстехіометричної концентрації гідрогену в гідриді титану. На приладі RH402 ми аналізували гідрид титану № 1 (табл. 1,2), зменшуючи масу аналітичного зразка від ~0,05 г до ~0,003 г. Зі зменшенням маси зразка ми отримали збільшення вмісту гідрогену від 3,80 до (6,0...6,5) % мас. Звичайно, це хибні результати. Вплив вологи, яка сконденсована на поверхнях частинок гідриду титану, визначено у роботі [8]. Також можливі помилки під час зважування аналітичного зразка. Прилади для визначення вмісту гідрогену в металах методом відновлювального плавлення в потоці газу — носія краще не використовувати для аналізу гідридів [8]. Аналізувати гідриди титану на вміст гідрогену необхідно на приладах типу CHN (фірми LECO, Eltra, Horiba та інш.), у яких аналітичний зразок спалюють у потоці газоподібного кисню з утворенням H_2O , кількість якої визначають на детекторі з інфрачервоним поглинанням. На цих приладах можна використовувати аналітичні зразки масою $\geq 0,20$ г.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику ступінчастого визначення вмісту домішок кисню та нітрогену в гідриді титану. Показано принципову можливість зменшення кількості домішок кисню та нітрогену в гідриді титану на етапі приготування багатокомпонентних сумішей до пресування та спікання шарів гідратованого титану (гідриду титану) з додатковими лігатурами.

2. Розроблено методики визначення вмісту гідрогену в гідридах титану. Використання приладів для визначення вмісту гідрогену в металах методом відновлювального плавлення в графітовому тиглі в потоці інертного газу обмежено необхідністю використання аналітичних зразків малою масою ($< 0,01$ г).

3. Результати визначення понадстехіометричного вмісту гідрогену в гідриді титану, які опубліковано, не можна вважати достовірними. Експерименти зі створення «понадстехіометричного» гідриду титану необхідно дуже ретельно готувати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- V. Duz, M. Matviychuk, A. Klevtsov, V. Moxson, Industrial application of titanium hydride powder, Metal Powder Report, 2017, January, Volume 72, Issue 1, p. 30—38.
- Ивасишин О.М., Саввакин Д.Г., Матвийчук М.В., Апробация порошков гидрированного титана производства ЗТМК в технологических процессах порошковой металлургии. Междунар. конф. «Ті — 2011 в СНГ», Львов, 25—28 апр. 2011, Киев, РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, (Ivasyshyn O.M., Savvakyn D.G., Matviychuk M.V., Test of hydrogenate titanium powder of ZTMK production in technologic processes of powder metallurgy, intern. conf. «Ti — 2011 in SNG» Lvov, 25—28 apr., Kyiv, RIO, IMPhys., named G.V. Kurdymov, NAN Ukraine), c/p 322—328.
- Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Саввакин Д.Г., Бондарчук В.И., Стасюк А.А., Приходько С.В., Микроструктура и свойства многослойных материалов на основе сплава Ti — 6Al — 4V, полученных по порошковой технологии. Междунар. конф. «Титан 2018. Производство и применение в Украине», 11—13 июня 2018, Киев, Украина (Ivasyshyn O.M., Markovsky P.E., Savvakyn D.G., Bondarchuk B.I., Stasyk A.A., Pryhodko S.V., Microstructure and properties polylayers materials, based on alloy Ti — 6Al — 4V, reserved by powder technology, intern. conf. «Titanium 2018. Production and application in Ukraine», 11—13 June 2018, Kyiv, Ukraine), c/p. 57—61.
- Богуслаев В.А., Жеманюк П.Д., Овчинников А.В., Леховицер З.В., Быков И.О., Получение авиационных деталей из жаропрочных спеченных титановых сплавов. Междунар. конф. «Титан 2018. Производство и применение в Украине», 11—13 июня 2018, Киев, Украина (Boguslajev V.A., Zhemanuk P.D., Ovchinnikov A.V., Lehovizer Z.V., Bykov I.O., Receiving of aircraft details from heatresistance coagulating titanium alloys. Intern. conf., «Titanium 2018. Production and application in Ukraine», 11—13 June 2018, Kyiv, Ukraine), c/p. 27—32.
- Дехтар А.И., Ивасишин О.М., Ковалев Д.И., Кордубан А.М., Прокудина В.К., Ратников В.И., Саввакин Д.Г., Сычев А.Е., Гуменяк Н.М., Особенности фазообразования при контролируемом гидрировании и дегидрировании титана разными методами, Металлофиз. новейшие технол. (Dehtar A.I., Ivasyshyn O.M., Kovalev D.I., Korduban A.M., Prokudina V.K., Ratnikov V.I., Savvakyn D.G., Sychev A.E., Gumenak N.M., Special feature of the phase transformations under checking titanium hydrogenation and dehydrogenation by different methods, Metallofiz. noveishie tekhnol., 2014, t/v. 36, № 9, c/p. 1153—1169.
- Прокудина В.К., Ковалев Д.Ю., Ратников В.И., Сычев А.Е., Бусурин С.М., Боровинская И.П., Беликова А.Ф., Сачкова Н.В., Влияние условий синтеза на структуру и фазообразование при CBS — гидрировании титана, Известия вузов ПМ и ФП (Prokudina V.K., Kovalev D.Yu., Ratnikov V.I., Sychev A.E., Busurin S.M., Borovinskaya I.P., Belikova A.F., Sachkova N.V., Influence of conditions of synthesis on structure and phase formation at SHS - hydrogenation of titanium, Izvestiya vuzov PM i FP), 2013, № 4, c/p. 38—44.
- Ливанов В.А., Буханова А.А., Колачев Б.А., Водород в титане, Ис. науч. тех. Издат., М. (Livanov V.A., Buhanova A.A., Kolachov B.A., Hydrogen in titanium, Gos.nauch.techn. izdat.M.), 1962, 245 s/p.
- Калинюк М.М., Визначення вмісту водню в гідридах перехідних металів 4А та 5А груп періодичної системи елементів, Метрологія та прилади (Kalyniuk M.M., Determination of hydrogen content in transition metal hydrides 4A and 5A groups of periodic system of elements, Metrology and instruments), 2016, № 3.
- Маккей К., Водородные соединения металлов, Мир, М. (Mackay K.M., Hydrogen compounds of the metallic elements, Mir, M.), 1968, 244 s/p.
- Антонова М.М., Свойства гидридов, Справочник, Наукова думка, К. (Antonova M.M., Properties of hydrides, Reference book, Naukova dumka, K.), 1965, 62 s/p.
- Михеева В.И., Гидриды переходных металлов, Издат. АН СССР, М. (Miheeva V.I., Hydrides of transition metals, Izdat. AN SSSR, M.), 1960.
- Андривеский Р.А., Материаловедение гидридов. Металлургия, М. (Andrievsky R.A., Material science of hydrides, Metallurgy, M.), 1986, 129 s/p.
- Табер А.М., Чельцова-Бебутова П.А., Гидриды переходных металлов. Мир, М. (Transition metal hydrides, Central Research Department, Experimental Station E.J. du Pont de Nemours and Co., Wilmington, Delaware, Varel Dekker, Inc., New York).
- Гидриды металлов. Под ред. Мюллера В., Блекеджа Д., Либовица Дж.: Пер. с англ. — М., Атомиздат (Muller V., Blackage D., Libowitz G.G., Metallic hydrides, M., Atomizdat), 1973, 429 s/p.
- Баймаков Ю.В., Лебедев О.А., Титан и водород, Труды Ленинград. политех. инст. (Bajmakov Y.V., Lebedev O.A., Titanium and hydrogen, Trans. Leningrad. polytechn. inst.), 1993, № 223, c/p. 25—34.
- Гвоздов С.П., Журенкова А.А., Система титан — водород, Изв. Вузов, ЧМ (Gvozдов S.P., Gurenkova A.A., System titanium — hydrogen, Izv. Vuzov, Ch.M.), 1960, № 9, c/p. 8—13.
- Шаповалов В.И., Сердюк Н.П., Титков А.Л., Диаграмма состояния титан — водород, Изв. Вузов. Цв. М. (Shapovalov V.I., Serduk N.P., Titkov A.L., Diagram condition of the titanium — hydrogen, Izv. Vuzov, Zv. M.), 1983, № 6, c/p. 74—78.
- Arita M., Shimizu K., Jchinose Y., Thermodynamics of the Ti — H System, Metallurgical Transact., A, 1982, August, vol. 13A, c/p. 1329—1336.
- Синяева Н.П., Кунин Л.Л., Вассерман А.М., Олесов Ю.Г., Определение кислорода в продуктах гидрирования титановых материалов, Порошковая металлургия (Sinaeva N.P., Kunin L.L., Vasserman A.M., Olesov Y.G., Determination oxygen in products of hydrogenation of titanium materials, Powder metallurgy), 1974, № 12, c/p. 70—75.
- Libowitz G.G., The nature and properties of transition metal hydrides, J. Nucl. Mater., 1960, vol. 2, p. 1—22.
- Gibb T.R.P., Primary Solid Hydrogen, Progress in Inorganic Chemistry, 1962, vol.3, p. 315—509.
- Антонова М.М., Стойкость гидридов некоторых переходных металлов при нагревании в вакууме, Укр. хим. ж. (Antonova M.M., Stability of certain transition metal hydrides during heating in vacuum, Ukr. chem., jour.), 1966, 32, № 6, c/p. 661—662.
- Калинюк М.М., Організація процесу аналізу титанових сплавів на вміст домішок кисню, азоту, водню та вуглецю, Метрологія та прилади (Kalyniuk M.M., Arrangement of the process of the analysis of titanium alloys on oxygen, nitrogen, Hydrogen and carbon impurities contents, Metrology and instruments), 2014, № 2.
- Калинюк М., Ісакова С., Пузрина Л., Аналізування металевих порошків на вміст домішок кисню, азоту, водню, Метрологія та прилади (Kalyniuk M., Isakova S., Puzrina L., Analyze of metallic powders on contents of the oxygen, nitrogen, hydrogen admixtures, Metrology and instruments), 2019, № 5, c/p. 62—69.
- Кутырева Г.А., Тараторкин Г.А., Косых В.Г., Михайличенко Л.И., Определение водорода в гидриде титана методом термического разложения в вакууме, Зав. лаб. (Kutyreva G.A., Taratorkin G.A., Kosykh V.G., Mihajlichenko L.I., Determination hydrogen in titanium hydrides by method of the thermal decomposition in vacuum, Zav. Lab.), 1975, v. 41, № 1, c/p. 22—24.
- Yu Guangcong, Z heng Liandi, Determination of Hydrogen in Titanium Hydride and Other High Hydrogen Specimens by Nitrogen Carrier Gas — High Frequency Hot Extraction Method, Anal. Chem., 1983, № 1, p. 12—16.
- Determination of Hydrogen in Titanium Hydride, Form № 203 — 601 — 233, Application Bulletin, LECO Corp., March, 1993.
- Oxygen and Hydrogen Determination in Titanium Hydride, Form № 203 — 821 — 458, Application Bulletin, LECO Corp., Nov., 2013.
- Oxygen and Hydrogen Determination in Titanium Hydride, Form № 203 — 821 — 475, Application Bulletin, LECO Corp., Sept., 2014.
- Гончар В.Я., Лискович В.А., Синяева Н.П., Рентгенографический метод определения содержания водорода в титане, Вopr. металловед. и технол. легк. и жаропроч. сплавов, Б.М. (Gonchar V.Y., Liskovich V.A., Sinaeva N.P., Rentgenografic method determination of hydrogen in titanium, Quest.metal. sci. and technol. light and heatresist. alloys, B.M.), 1980, c/p. 169—171.
- Ильенко В.С., Демиденко Л.М., Экспрессное определение водорода в гидриде титана и дегидрированных титановых порошках методом протонного магнитного резонанса, Зав. лаб. (Il'enko V.S., Demidenko L.M., Express determination of hydrogen in titanium hydrides and dehydrogenating titanium powders by method of proton — magnetic resonance, Zav. Lab.), 1986, 52, № 9, c/p. 36—37.
- Алексеев Р.И., Новосад Л.Г., Диффузионно — гравиметрический метод определения водорода в гидридах, Зав. лаб. (Alekseev R.I., Novosad L.G., Diffusion — gravimetric method determination of hydrogen in hydrides, Zav. Lab.), 1975, 41, № 4, c/p. 451—452.
- Sieverts A., Krumbhaar W., Ueber die Löslichkeit von Gasen in Metallen und Legierungen, Ber. Deut. Chem. Ges., 1910, v. 85, p. 893.
- Sievers A., Palladium und Wasserstoff. 1. 1914, 88, № 1, 103 — 123. Zeitschrift f. Phys.Chem., 2. 1914, 88, № 4, p. 451—478.
- Калинюк Н.Н., Растворимость водорода в твердом и жидком палладии, Журнал физич. химии (Kalyniuk M.M., Solubility of hydrogen in solid and liquid palladium, Journ.phys. chemistry), 1980, № 11.
- Carbon in Titanium and Zirconium, Form № 203 — 601 — 050, Application Bulletin, LECO Corp., May 1990.
- Carbon in Titanium and Zirconium Base Materials, Form № 203 — 601 — 256, Application Bulletin, LECO Corp., June 1997.
- Клячко Ю.А., Атласов А.Г., Шапиро М.М., Анализ газов, неметаллических включений и карбидов в стали, Госнаучтехиздат, М. (Klachko Y.A., Atlasov A.G., Shapiro M.M., Analysis gases, non — metallic inclusions and carbides In steel, Gosnauchtekhizdat, M.), 1953, 596 c/s.
- Еремينا Б.Г., Газовый анализ, Госнаучтехиздат, Л. (Eremina B.G., Gas analysis, Gosnauchtekhizdat), L., 1955, 380 c/s.
- Кунина Л.Л., Суrowой Ю.Н., Вассерман А.М., Определение газов в металлах, Наука, М. (Kunin L.L., Surowoj Y.N., Vasserman A.M., Determination gases in metals, Nauka, M.), 1976, 344 c/s.
- Richardson F.D., Alcock C.B., Chemical Equilibria. Chipman J., Elliott J.F., Averbach B.L., Experimental equilibrium methods at high temperature. The Physical Chemistry of Metallic Solutions and Intermetallic Compounds, Symposium, 1958, vol. 1, № 9.

Отримано / received: 22.01.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.В. Фальченком,

Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона, Київ, Україна.

Prof. Yu.V. Falchenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(1)2021.65-71

УДК 621.317.335

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ДИСПЕРСІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТКОВИХ ЄМНОСТЕЙ ІЗОЛЯЦІЇ ТРЬОХЖИЛЬНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУКУПНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Peculiarities of Calculation of Variance of the Results of Determination of Partial Capacitances of Insulation in Three-Core Power Cables by Applying Aggregate Measurements

І. О. Костюков, доцент кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, ORCID: 0000-0002-8923-0579 e-mail iakostiukow@gmail.com

I. O. Kostiukov, associate professor of the department of electrical insulation and cable engineering, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Ukraine, ORCID: 0000-0002-8923-0579 e-mail iakostiukow@gmail.com

Представлено результати аналізу складових, що визначають величини дисперсії та середнього квадратичного відхилення результатів визначення часткових ємностей між електропровідними елементами конструкції трьохжильних силових кабелів з паперовою ізоляцією в спільній металевій оболонці. Проаналізовано можливість існування кореляційних зв'язків між результатами вимірювання сукупних величин електричних ємностей трьохжильного силового кабелю, отриманими із застосуванням наведених у статті способів підключення вимірювача іммітансу до досліджуваного зразка кабелю. Проведено розрахунок коефіцієнтів кореляції між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності. Наведено формули для розрахунку дисперсії та середнього квадратичного відхилення результатів визначення часткових ємностей. Показано, що для наведених у статті результатів вимірювань нехтування складовими дисперсії, зумовленими кореляційними зв'язками між отриманими із застосуванням розглянутих у статті способів підключення вимірювача іммітансу результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності за розрахунку дисперсії результатів вимірювань, призводить до відносної похибки оцінювання середнього квадратичного відхилення, що перевищує 30%. Результати проведеного аналізу показали необхідність урахування кореляційних зв'язків між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності за розрахунку дисперсії незалежно від висновку щодо існування кореляційного зв'язку за прийнятого під час оцінювання рівня значимості.

This article presents the results of the analysis of components that determine the values of variance and standard deviation of the results of determining the values of partial capacitances between the conductive elements of construction of three-core power cables with paper insulation in a common metal sheath. The possibility of existence of correlations between the results of measurements aggregate values of electrical capacities of a three-core power cable, obtained by using the described in the article methods of connection immittance meter to the tested sample of power cable, is analyzed. The calculations of correlation coefficients between the results of measurements of aggregate values of electrical capacitance are carried out. Formulas for calculations the variance and standard deviation of the results of estimation of partial capacitances are given. It was shown that for presented results of measurements neglect by the components of variance that arise due to the correlations between the results of measurements of aggregate values of electric capacitance obtained by applying methods of connection of immittance meter considered in the article to tested cable, can lead to the relative error of standard deviation estimation that exceeds 30%. The results of the analysis have shown the necessity of taking into considerations the correlation between the results of measurements of aggregate values of electrical capacitance for the calculations of variance, regardless on the conclusion about the existence of correlation under the accepted level of significance.

Ключові слова: математичне сподівання, контроль стану ізоляції, коефіцієнт кореляції, середнє квадратичне відхилення.
Keywords: mathematical expectation, insulation condition monitoring, correlation coefficient, standard deviation.

1. ВСТУП

Актуальність задачі вимірювання електричних ємностей між електропровідними елементами конструкції трьохжильних силових кабелів, у першу чергу, зумовлена необхідністю діагностики технічного стану їх ізоляції через значний строк експлуатації силових кабелів в електричних мережах енергосистеми України. Так, наприклад, згідно із наведеними в [1] даними, станом на 2013 рік близько 13 % кабельних мереж АК «Харківобленерго» перебували в експлуатації більше 50 років, 31 % перебували в експлуатації від 30 до 50 років, 53 % кабельних ліній експлуатувалися від 10 до 30 років. Разом із тим, частка кабелів зі строком експлуатації



до 10 років складала лише 3 %. В задачах діагностики технічного стану ізоляції силових кабелів виміряні значення часткових ємностей між жилами трьохжильних силових кабелів, а також між їх жилами та оболонкою часто відіграють допоміжне значення, оскільки на основі виміряних значень часткових ємностей розраховуються значення тангенса кута діелектричних втрат ізоляції досліджуваного кабелю, які в подальшому і використовуються як інформативні показники технічного стану ізоляції [2]. Разом із тим, в деяких випадках саме значення часткових ємностей можуть використовуватися як самостійні діагностичні критерії. Так, згідно із наведеними у [3] даними, для кабельних мереж на напругу до 35 кВ виміряне значення питомої електричної ємності не повинно відрізнятися більше ніж на 5 % від наведених виробником силового кабелю даних.

Незважаючи на стійку тенденцію заміни силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією на силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену, що протягом останніх років спостерігається у багатьох країнах світу, силові кабелі з паперовою ізоляцією все ще дуже поширені в енергосистемах. Для трьохжильних силових кабелів із паперовою ізоляцією в спільній металевій оболонці вимірювання електричної ємності шарів ізоляції між електропровідними елементами конструкції супроводжується рядом специфічних проблем. До таких проблем, у першу чергу, відноситься необхідність вимірювання параметрів ізоляції за наявності великої кількості паразитних параметрів досліджуваного ізоляційного прошарку, внаслідок існування ємнісного зв'язку між жилами силового кабелю та між його жилами й оболонкою. У такому випадку вимірювання часткових ємностей силових кабелів можливе із застосуванням як прямих, так і сукупних вимірювань. Прямі вимірювання часткових ємностей можуть бути проведені, наприклад, шляхом використання розглянутих у [4—6] перетворювачів електричної ємності в напругу. Разом із тим, у випадку вимірювань із застосуванням серійних вимірювачів іммітансу (наприклад, таких як E7-14) достатньо великі значення паразитних ємностей досліджуваного ізоляційного проміжку зумовлюють втрату точності за вимірювань як значень часткових ємностей, так і тангенса кута діелектричних втрат досліджуваних ізоляційних проміжків [7, 8]. Зазначені складнощі можуть бути вирішені за використання методик визначення часткових ємностей, що базуються на застосуванні сукупних вимірювань [9-11]. Під час застосування таких методик були детально

проаналізовані, наприклад, такі питання, як способи формування систем лінійних алгебраїчних рівнянь, а також проблеми стійкості розв'язання систем рівнянь [12]. Разом із тим, залишається нерозглянутим таке питання, як визначення дисперсії результатів вимірювання, вирішенню якого і присвячені ця стаття.

Мета статті полягає в аналізі особливостей розрахунку дисперсії та середнього квадратичного відхилення отриманих із застосуванням сукупних вимірювань результатів визначення часткових ємностей шарів ізоляції між електропровідними елементами конструкції трьохжильних силових кабелів.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для визначення особливостей розрахунку дисперсії результатів визначення часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань у статті розглянуто способи формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення часткових ємностей, проаналізовано кореляційні зв'язки між результатами вимірювання сукупних значень електричних ємностей, проведено серію вимірювань сукупних значень електричних ємностей за різних способів під'єднання вимірювача іммітансу до досліджуваного силового кабелю, а також проведено серію розрахунків часткових ємностей для порівняння фактично розрахованої дисперсії результатів вимірювань із результатами застосування наведених формул.

2.1 Формування системи рівнянь та аналіз виразів для визначення часткових ємностей

Окремі значення електричної ємності між електропровідними елементами конструкції трьохжильних силових кабелів можна оцінити із застосуванням описаної в [2] методики. Через складну конструкцію, яка зумовлює численні паразитні параметри досліджуваного ізоляційного проміжку, прямі вимірювання окремих ємнісних параметрів внутрішніх шарів ізоляції можуть бути проведені лише за достатньо жорстких обмежень. Тому зазначена методика передбачає проведення кількох вимірювань, які дозволяють визначити сукупні значення електричної ємності. Індивідуальні значення часткових ємностей розраховуються шляхом розв'язування системи алгебраїчних рівнянь, яка формується на основі отриманих сукупних значень електричної ємності, виміряних із застосуванням представлених на рис. 1 схем обстеження ізоляції.

Неважко зробити висновок, що у випадку застосування представленої на рис. 1а схеми підключення сукупні результати вимірювань електричної

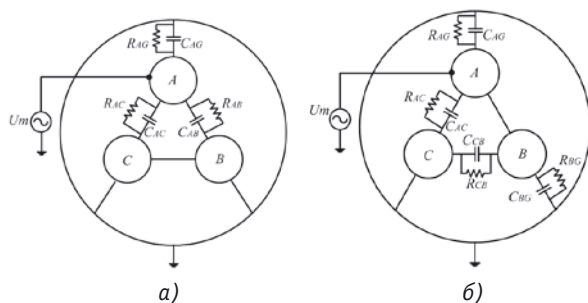


Рис. 1. Схеми обстеження ізоляції трьохжильних силових кабелів для формування системи рівнянь для оцінювання часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань: а — за подавання випробувальної напруги на одну жилу силового кабелю; б — за подавання випробувальної напруги на дві жили силового кабелю

Fig. 1. Schemes of examining insulation of three core power cables for forming system of equations for the estimation of partial capacitances by applying aggregate measurements

ємності визначатимуться шляхом розрахунку суми трьох окремих значень електричної ємності:

$$C_A = C_{AC} + C_{AB} + C_{AG}, \quad (1)$$

де C_A позначає значення електричної ємності, визначене у випадку прикладання випробувальної напруги до жили A силового кабелю, C_{AC} , C_{AB} , C_{AG} , відповідно, позначають значення часткових ємностей між жилами A і C , A і B та між жилою A та заземленою оболонкою кабелю.

У випадку застосування представленої на рис. 1б схеми підключення результат вимірювань електричної ємності визначатиметься чотирма окремими значеннями електричної ємності:

$$C_{A-B} = C_{AC} + C_{CB} + C_{AG} + C_{BG}, \quad (2)$$

де C_{A-B} — сукупне значення електричної ємності, визначене для випадку прикладання випробувальної напруги до з'єднаних між собою жил A і B силового кабелю, а C_{CB} та C_{BG} , відповідно, позначають значення часткових ємностей між жилами C і B та між жилою B та заземленою оболонкою силового кабелю.

Після трьох послідовних вимірювань із застосуванням подібних до представлених на рис. 1а схем обстеження, тобто шляхом послідовного прикладання випробувальної напруги до жил A , B і C , коли дві інші жили з'єднані з оболонкою і заземлені, з подальшими трьома послідовними вимірюваннями із застосуванням подібних до представлених на рис. 1б схем, тобто шляхом послідовного подавання випробувальної напруги на з'єднані разом жили A і B , B і C , нарешті, A і C , коли третя жила з'єднана з оболонкою і заземлена, за сукупних вимірювань часткових ємностей між електропровідними елементами конструкції трьохжильних силових кабелів, формують систему рівнянь для окремих зна-

чень часткових ємностей у трьохжильному силовому кабелі.

У матричних позначеннях цю систему можна записати згідно із (3):

$$Ac = b, \quad (3)$$

де вектор b містить отримані із застосуванням наведених на рис. 1а та рис. 1б схем результати вимірювань сукупних ємностей: $b = [C_A, C_B, C_C, C_{A-B}, C_{B-C}, C_{A-C}]^T$, c — вектор, що містить невідомі значення електричних ємностей між жилами силового кабелю та між його жилами та оболонкою: $c = [C_{AB}, C_{BC}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}, C_{CG}]^T$, а рядки та стовпчики матриці A можуть бути визначені згідно із (4):

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Ураховуючи відносно невеликий порядок системи рівнянь (3), її розв'язок достатньо просто отримати в аналітичному виді. За аналітичного розв'язання системи (3) невідомі значення часткових ємностей можна визначати згідно із виразом:

$$c = A^{-1}b, \quad (5)$$

де A^{-1} — обернена до (4) матриця. Рядки та стовпчики матриці A^{-1} можуть бути визначені згідно із (6):

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & 0 & -0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & -0,5 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & -0,5 \\ 0 & -0,5 & -0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 \\ -0,5 & 0 & -0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 \\ -0,5 & -0,5 & 0 & 0 & 0,5 & 0,5 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Приймаючи до уваги (6), можна записати в явному вигляді вирази для значень часткових електричних ємностей між електропровідними елементами конструкції силового кабелю, отримані під час розв'язування системи рівнянь (3):

$$C_{AB} = 0,5C_A + 0,5C_B - 0,5C_{A-B}, \quad (7)$$

$$C_{BC} = 0,5C_B + 0,5C_C - 0,5C_{B-C}, \quad (8)$$

$$C_{AC} = 0,5C_A + 0,5C_C - 0,5C_{A-C}, \quad (9)$$

$$C_{AG} = -0,5C_B - 0,5C_C + 0,5C_{A-B} + 0,5C_{B-C}, \quad (10)$$

$$C_{BG} = -0,5C_A - 0,5C_C + 0,5C_{A-B} + 0,5C_{B-C}, \quad (11)$$

$$C_{CG} = -0,5C_A - 0,5C_B + 0,5C_{A-C} + 0,5C_{B-C}. \quad (12)$$

Із виразів (7—12) видно, що дисперсія та математичне сподівання розрахованих значень часткових ємностей ізоляції визначатимуться відповідними параметрами сукупних результатів вимірювання електричної ємності за застосування різних комбінацій із наведених на рис. 1 схем обстеження ізоляції.

При цьому дисперсія часткових ємностей визначатиметься дисперсіями відповідних результатів сукупних вимірювань лише за відсутності кореляційних зв'язків між результатами сукупних вимірювань, наявність таких кореляційних зв'язків може призводити до зміни дисперсії результатів вимірювання часткових ємностей.

2.2. Результати вимірювання сукупних значень електричної ємності

Для дослідження наявності можливих кореляційних зв'язків між результатами вимірювання сукупних величин електричної ємності та їх впливу на дисперсію результатів вимірювання часткових ємностей проведено серію із 28 вимірювань сукупних ємностей зраз-

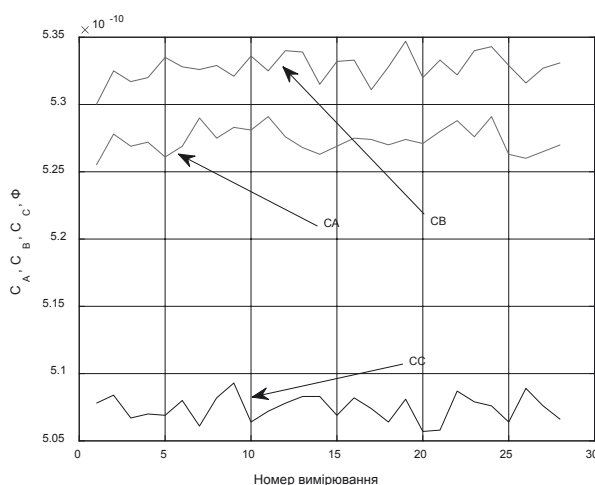


Рис. 2. Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності із застосуванням представленої на рис. 1а схеми обстеження

Fig. 2. The results of iterated measurements of aggregate values of electrical capacitance by applying presented on fig. 1a scheme of examining

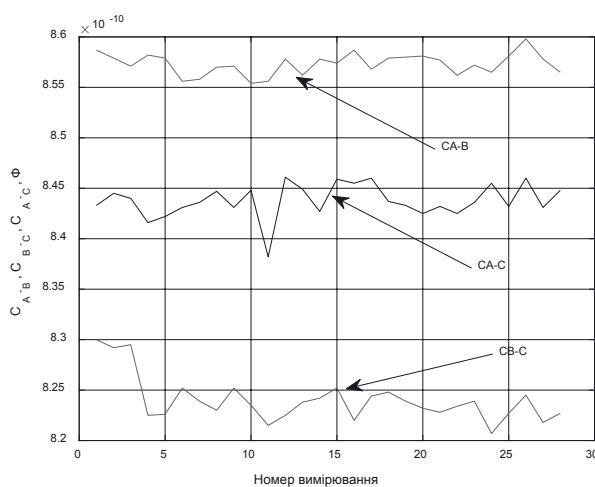


Рис. 3. Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності за застосування наведеної на рис. 1б схеми обстеження

Fig. 3. The results of iterated measurements of aggregate values of electrical capacitance by applying presented on fig. 1b scheme of examining

ка трьохжильного силового кабелю типу ААШв 6-3×150 після 24 років експлуатації на Хмельницькій атомній станції. Вимірювання проведені із застосуванням наведених на рис. 1 схем обстеження за частоти тестового сигналу вимірювача іммітансу, що дорівнювала 1000 Гц. Усі вимірювання проведені вимірювачем іммітансу DE-5000. Середнє квадратичне значення випробувальної напруги складало 0.5 В. Таке невисоке значення випробувальної напруги за вимірювань дозволяє уникнути впливу нелінійних явищ на результати проведених вимірювань через можливу появу в ізоляції часткових розрядів під час високовольтних випробувань.

Результати вимірювань наведено на рис. 2—3.

2.3. Аналіз кореляційних зв'язків між результатами вимірювання електричної ємності

Наявність кореляційних зв'язків між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності, отриманими із застосуванням наведених на рис. 1 схем обстеження ізоляції, та відповідний їх вплив на дисперсію отриманих результатів у статті буде проілюстровано на прикладі визначення електричної ємності ізоляційного проміжку між жилами А і В досліджуваного силового кабелю. Як можна бачити із (7), для цього необхідно дослідити кореляційні зв'язки між сукупними значеннями електричної ємності C_A , C_B та C_{A-B} .

На рис. 4 проілюстровано кореляційний зв'язок між масивами даних, що містять результати вимірювань електричної ємності C_A та C_{A-B} .

Для наведених на рис. 4 даних розрахований коефіцієнт кореляції становить $r = -0.61$. За об'єму вибірки

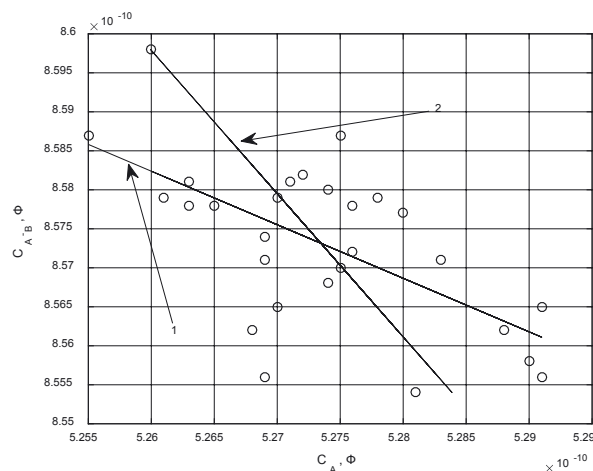


Рис. 4. Залежність між величинами електричної ємності, вимірюваними за застосування схем обстеження ізоляції на рис. 1, та відповідні лінії регресії: 1 — лінія регресії C_{A-B} на C_A , 2 — лінія регресії C_A на C_{A-B}

Fig. 4. The dependence between the values of electrical capacitance measured by applying presented on fig. 1. schemes of examining and corresponding lines of regression: 1 — regression line C_{A-B} on C_A , 2 — regression line C_A on C_{A-B}

$n = 28$ розраховане значення t — критерію за своєю абсолютною величиною складає $T_n = 3.9$. За рівня значимості $\alpha = 0.01$ критичне значення розподілу Ст'юдента складає лише $t_{кр} = 2.78$. Отже, за прийнятого рівня значимості α можна прийняти гіпотезу щодо існування кореляційного зв'язку для наведених на рис. 4 даних. Зазначений висновок стосовно наявності кореляційного зв'язку є достатньо неоднозначним. Оскільки у відповідності з (1, 2) значення C_A та C_{A-B} , окрім інших значень часткових ємностей, визначаються величинами часткових ємностей C_{AC} та C_{AG} , можна зробити висновок щодо існування залежності між вимірними сукупними значеннями електричної ємності C_A та C_{A-B} . Разом із тим, існування кореляційного зв'язку між масивами даних, що містять результати вимірювань C_A та C_{A-B} , одночасно суперечить тому, що результати проведених вимірювань у кожному із отриманих масивів даних є незалежними один від одного. При цьому також суттєво відзначити достатньо несподівану саме від'ємну кореляцію між наведеними на рис. 4 даними. Разом із тим, якщо припустити, що у відповідності із (1, 2) кореляційний зв'язок між вимірними сукупними значеннями електричної ємності C_A та C_{A-B} , зумовлений внеском C_{AC} та C_{AG} у відповідні сукупні значення електричної ємності, то збільшення сукупного значення C_A повинно призводити до збільшення C_{A-B} , що суперечить від'ємному знаку коефіцієнта кореляції.

На рис. 5 проілюстровано кореляційний зв'язок між масивами даних, що містять результати вимірювань електричної ємності C_A та C_B .

На відміну від попереднього випадку, для наведених на рис. 5 даних коефіцієнт лінійної кореляції

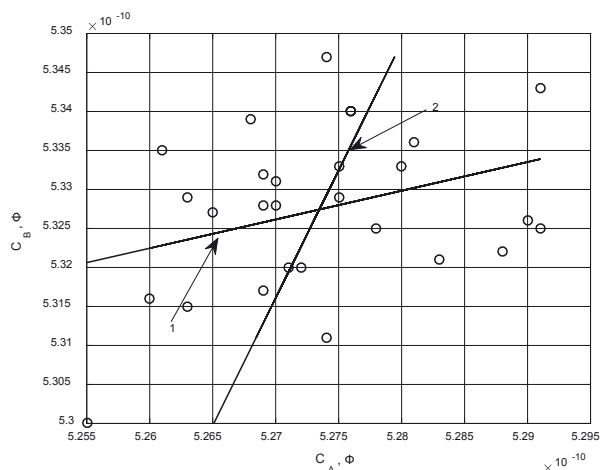


Рис. 5. Залежність між величинами електричної ємності, вимірюваними за застосування схеми обстеження ізоляції на рис. 1а, та відповідні лінії регресії: 1 — лінія регресії C_B на C_A , 2 — лінія регресії C_A на C_B

Fig. 5. The dependence between the values of electrical capacitance measured by applying presented on fig. 1a. schemes of examining and corresponding lines of regression

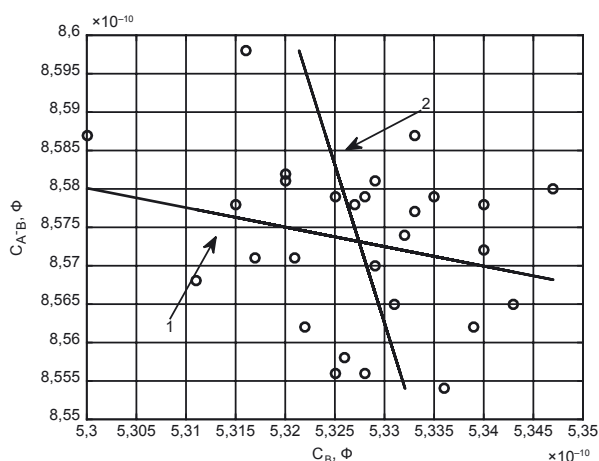


Рис. 6. Залежність між величинами електричної ємності, вимірюваними за застосування схеми обстеження ізоляції на рис. 1а та рис. 1б, та відповідні лінії регресії: 1 — лінія регресії C_B на C_{A-B} , 2 — лінія регресії C_{A-B} на C_B

Fig. 6. The dependence between the values of electrical capacitance measured by applying presented on fig. 1. schemes of examining and corresponding lines of regression

складає $r = 0.34$. За об'єму вибірки $n = 28$ величина t — критерію складає $T_n = 1.82$, а критичне значення розподілу Ст'юдента, навіть за рівня значимості $\alpha = 0.05$, складає $t_{кр} = 2.06$. Зазначене співвідношення між T_n та $t_{кр}$ не дозволяє відкинути гіпотезу щодо нульового значення коефіцієнта кореляції. Зробити це можна лише за рівня значимості $\alpha = 0.1$, коли $t_{кр}$ зменшується до $t_{кр} = 1.71$, що свідчить стосовно суттєво ослабленого зв'язку між даними на рис. 5. На рис. 6 наведено результати вимірювання сукупних ємностей C_B та C_{A-B} .

Для наведених на рис. 6 даних розрахований коефіцієнт кореляції складає лише $r = -0.25$, а величина t — критерію складає $T_n = 1.32$, що не дозволяє прийняти гіпотезу щодо існування кореляції між масивами даних C_B та C_{A-B} навіть за рівня значимості $\alpha = 0.1$.

2.4. Вплив кореляційних зв'язків між результатами вимірювання електричної ємності на дисперсію отриманих значень часткових ємностей

Для визначення впливу кореляційних зв'язків між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності із застосуванням наведених на рис. 1 схем обстеження на дисперсію отриманих результатів було проведено серію розрахунків згідно із виразами (7—12). У такому випадку вирази для дисперсії результатів вимірювання електричної ємності ізоляційного проміжку між жилами А і В досліджуваного силового кабелю, відповідно, за врахування існування кореляційних зв'язків між результа-

тами вимірювання електричної ємності та за нехтування цими зв'язками можна записати у виді:

$$D_{AB} = 0,25(D_{CA} + D_{CB} + D_{CAB}), \quad (13)$$

$$D_{KAB} = 0,25(D_{CA} + D_{CB} + D_{CAB} - 2K_{CACB} + 2K_{CASCB} - 2K_{CBCAB}), \quad (14)$$

де D_{AB} , D_{KAB} , відповідно, позначають величини дисперсії результатів вимірювання за нехтування кореляційними зв'язками між величинами C_A , C_B та C_{AB} у (7) та за врахування наявності цих зв'язків, K_{CACB} — коефіцієнт коваріації між масивами даних, що містять результати вимірювання електричної ємності під час подавання випробувальної напруги на жилу A силового кабелю у відповідності із наведеною на рис. 1а схемою, та під час подавання випробувальної напруги на з'єднанні між собою жили A і B у відповідності із наведеною на рис. 1б схемою, K_{CASCB} — коефіцієнт коваріації між масивами даних, що містять результати вимірювання електричної ємності під час подавання випробувальної напруги на жилу A та жилу B силового кабелю у відповідності із наведеною на рис. 1а схемою, K_{CBCAB} — коефіцієнт коваріації між масивами даних, що містять результати вимірювання електричної ємності під час подавання випробувальної напруги на жилу B силового кабелю у відповідності із наведеною на рис. 1а схемою, та під час подавання випробувальної напруги на з'єднанні між собою жили A і B у відповідності із наведеною на рис. 1б схемою. За запису виразів (13, 14) урахувалося, що добуток випадкової величини на довільну константу c призводить до збільшення дисперсії випадкової величини в c^2 разів. Приймаючи до уваги (13, 14), відповідні вирази для середніх квадратичних відхилень результатів вимірювання можна записати у виді:

$$\sigma_{AB} = \sqrt{D_{AB}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{KAB} = \sqrt{D_{KAB}}, \quad (16)$$

Ураховуючи неоднозначну інтерпретацію результатів розрахунку коефіцієнта кореляції для наведених на рис. 4 даних, було також проведено розрахунки середнього квадратичного відхилення результатів вимірювань без урахування коефіцієнта коваріації між наведеними на рис. 4 результатами вимірювання. Для цього випадку дисперсія результатів вимірювання D_{KAB} розраховувалася згідно із (17):

$$D_{K_{-}AB} = 0,25(D_{CA} + D_{CB} + D_{CAB} + 2K_{CASCB} - 2K_{CBCAB}). \quad (17)$$

Ураховуючи (17), середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань без урахування коваріації між наведеними на рис. 4 результатами вимірювання було розраховано згідно із (18):

$$\sigma_{K_{-}AB} = \sqrt{D_{K_{-}AB}}. \quad (18)$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 7 наведено динаміку зміни середнього квадратичного відхилення результатів розрахунку електричної ємності між жилами A і B силового кабелю залежно від кількості проведених вимірювань. Розрахунки були проведені за формулами (15, 16, 18), а також шляхом прямого розрахунку дисперсії та середнього квадратичного відхилення результатів розрахунку часткової ємності, отриманих із застосуванням (7).

Із аналізу наведених на рис. 7 даних можна зробити висновок, що результати розрахунку середнього квадратичного відхилення, визначені із використанням (16), збігаються з результатами, отриманими шляхом прямого розрахунку середнього квадратичного відхилення результатів розрахунку C_{AB} . Розрахунок за виразом (18), без урахування кореляційних зв'язків між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності із застосуванням наведених на рис. 1 схем, призводить до суттєвої втрати точності. На рис. 8 наведено значення відносної похибки результатів розрахунку середнього квадратичного відхилення, отриманих за використанням (15, 18).

Із наведених на рис. 8 даних можна зробити висновок, що для результатів розрахунку, отриманих за нехтування кореляційними зв'язками між сукупними значеннями електричної ємності, відносна похибка розрахунку середнього квадратичного відхилення

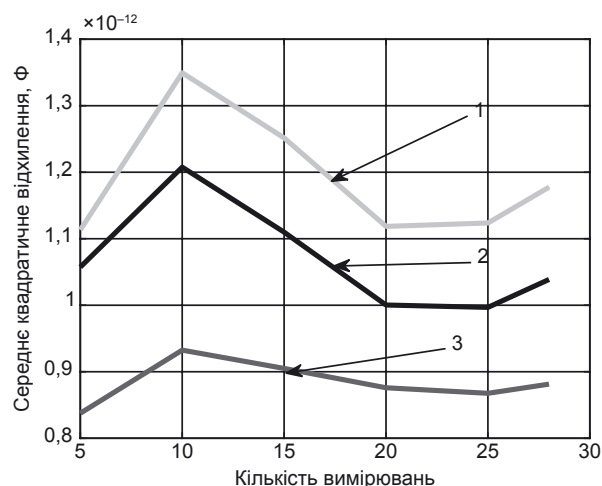


Рис. 7. Результати розрахунку середнього квадратичного відхилення електричної ємності ізоляційного проміжку між жилами A і B силового кабелю: 1 — прямий розрахунок середнього квадратичного відхилення та розрахунок згідно із (16), 2 — розрахунок згідно із (18), 3 — розрахунок згідно із (15)

Fig. 7. The results of standard deviation calculation of the electrical capacitance between the cores A and B of power cable

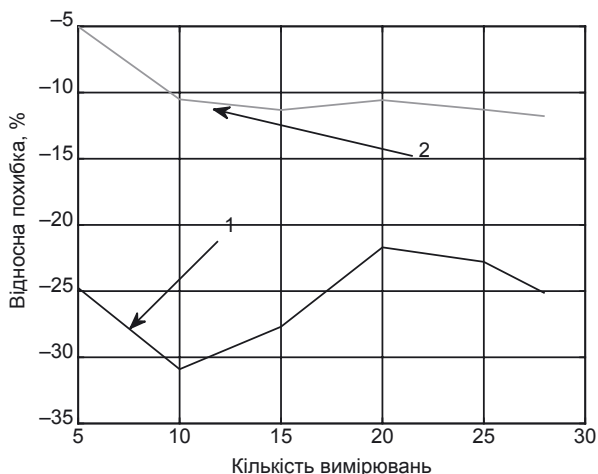


Рис. 8. Відносна похибка розрахунку середнього квадратичного відхилення: 1 — для випадку нехтування коваріацією між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності, 2 — для випадку нехтування коваріацією між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності C_A та $C_{A,B}$

Fig. 8. Relative error of calculation of standard deviation

може перевищувати 30 %. За нехтування лише кореляційним зв'язком між C_A та $C_{A,B}$ відносна похибка зменшується, проте перевищує 10 %.

При цьому суттєву роль у зменшенні дисперсії та, відповідно, середнього квадратичного відхилення результатів відіграє те, що результати визначення часткових ємностей згідно із (7-12) розраховуються із використанням зменшених в 2 рази результатів сукупних значень електричних ємностей, завдяки чому всі компоненти дисперсії результатів вимірювання часткових ємностей зменшуються у 4 рази.

4. ВИСНОВКИ

Проведені розрахунки засвідчили, що дисперсія та середнє квадратичне відхилення отриманих із застосуванням сукупних вимірювань результатів визначення часткових ємностей трьохжильних силових кабелів значною мірою визначаються можливими кореляційними зв'язками між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності. Збільшення коефіцієнта кореляції, очевидно, призводить до збільшення зазначеного впливу. Разом із тим для проведених вимірювань вплив кореляційних зв'язків є помітним незалежно від величини розрахованих коефіцієнтів кореляції та висновку щодо існування кореляційного зв'язку між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності за прийнятого під час оцінювання рівня значимості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- Ганус А.И. (2015) Опыт АК «Харьковоблэнерго» по эксплуатации кабельных линий // Электрические сети и системы (Ganus A.I. (2015) Experience of JSC «Kharkovoblenergo» on operation of cable lines // Electrical networks and systems). — № 5. — С/Р. 37—43.
- Москвитин Е.С. (2011) Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по измерениям диэлектрических характеристик изоляционных промежутков // Вісник НТУ «ХПІ» (Moskvitin E.S. (2011) Control of processes of power cables with paper impregnated insulation aging by measurements of dielectric properties of insulation layers // Bulletin of NTU «KhPI»). — № 3. — С/Р. 95—106.
- Беспровзванных А.В., Москвитин Е.С., Кессаев А.Г. (2015) Абсорбционные характеристики фазной и поясной бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей на постоянном напряжении // Электротехника и электромеханика (Besprozvannykh A.V., Moskvitin E.S., Kessaev A.G. (2015) The absorption characteristics of the phase and zone paper impregnated insulation of power cable at direct voltage // Electrical Engineering & Electromechanics). — № 5. — С/Р. 63—68.
- Liao Ming-yan, Wang Ke-hua, Tian Ye (2010) Micro-capacitance measurement based on phase-sensitive detection, Proceedings of the Third International Symposium on Information Science and Engineering, Shanghai, China, P. 375—378. doi:10.1109/ISISE.2010.42
- Sun S., Cao Z., Huang A., Xu L., Yang W. (2017) A high-speed digital electrical capacitance tomography system combining digital recursive demodulation and parallel capacitance measurement // IEEE Sensors Journal. — № 17(20). — P. 6690—6698. doi:10.1109/JSEN.2017.2750741
- Zhenhua Hao, Ziqiang Cui, Shihong Yue, Huaxiang Wang (2018) Amplitude demodulation for electrical capacitance tomography based on singular value decomposition // Review of Scientific Instruments. — № 89(7). — P. 074705. doi:10.1063/1.5038629
- Набока Б.Г., Беспровзванных А.В., Штангей А.С., Радченко О.Н. (2005) Методика прямых измерений параметров частичных емкостей многожильных кабелей // Вестник НТУ «ХПІ» (Naboka B.G., Besprozvannykh A.V., Shtangey A.S. (2005) Parameters of partial capacities as an indicator of a condition of control cables on a nuclear power plant // Bulletin of NTU «KhPI»). — № 42. — С/Р. 80—86.
- Беспровзванных А.В., Набока Б.Г. (2011) Влияние паразитных емкостей на результаты измерений параметров многожильных кабелей при оценке их технического состояния // Электричество (Besprozvannykh A.V., Naboka B.G. (2011) Influence of parasitic capacitances on the results of measuring the parameters of multicore cables when assessing their technical condition // Electrichestvo). — № 5. — С/Р. 27—36.
- Беспровзванных А.В. (2008) Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений // Технічна електродинаміка (Besprozvannykh A.V. (2008) Dielectric scanning of the transverse structure of multicore cables using the cumulative measurement method // Technical Electrodynamics). — № 3. — С/Р. 30—36.
- Набока Б.Г., Беспровзванных А.В., Штангей А.С. (2005) Параметры частичных емкостей как индикатор состояния контрольных кабелей АЭС // Электротехника и электромеханика (Naboka B.G., Besprozvannykh A.V., Shtangey A.S. (2005) Parameters of partial capacities as an indicator of a condition of control cables on a nuclear power plant // Electrical Engineering & Electromechanics). — № 3. — С/Р. 80—82.
- Беспровзванных А.В., Москвитин Е.С. (2013) Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией // Электротехника и электромеханика (Besprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. (2013) Estimation criteria for degree of paper-impregnated insulated power cable ageing // Electrical Engineering & Electromechanics). — № 4. — С/Р. 32—36.
- Беспровзванных А.В., Рудаков С.В., Москвитин Е.С. (2013) Предотвращение чрезвычайных ситуаций путем контроля состояния изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей и тангенсу угла диэлектрических потерь / А.В. Беспровзванных, С.В. Рудаков, Е.С. Москвитин // Х.: КП «Міська друкарня» (Besprozvannykh A.V., Rudakov S.V., Moskvitin E.S. (2013) Predotvrashchenie chrezvychajnykh situacij putem kontrolja sostojanija izoljacii mnogozhil'nykh kabelej po parametram chastichnykh emkостей i tangensu ugla dijelektricheskikh poter' / A.V. Besprozvannykh, S.V. Rudakov, E.S. Moskvitin // Kh.: KP «Mіs'ka drukarnja»). — 132 с/р.

Отримано / received: 22.02.2021.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.О. Стороженком, Харківський національний університет радіоелектроніки (Україна).
Prof. V.O. Storozhenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

ДО 80-РІЧЧЯ ЛЕОНІДА АНДРІЙОВИЧА НАЗАРЕНКА

16 лютого виповнилося 80 років від дня народження професору кафедри світлотехніки і джерел світла Харківської академії міського господарства (ХАМГ) **Леоніду Андрійовичу Назаренку** — доктору технічних наук, професору, Лауреату Державної премії України у галузі науки і техніки.

Народився ювіляр на Харківщині. Закінчивши школу у 1958 році, рік працював токарем на Харківському електроапаратному заводі, вчився на радіофізичному факультеті Харківського університету, в аспірантурі, працював у Харківському інституті радіоелектроніки. Здобувши науковий ступінь кандидата фізико-математичних наук, обирається у 1973 році за конкурсом на посаду начальника сектору фізики плазми, а через 5 років — начальника відділу температурних і теплофізичних вимірювань Харківського державного НДІ метрології (ХДНДІМ), згодом — директора наукового центру ННЦ «Інститут метрології».

Наукова діяльність Л.А. Назаренка у початковому періоді стосувалася досліджень випромінювання і розсіяння електромагнітних хвиль на неоднорідних плазменних утвореннях.

У ХДНДІМ за часів СРСР за ініціативою Леоніда Андрійовича та за його активною участю виконано роботи, спрямовані на випереджальний розвиток метрологічного забезпечення вимірювань, зокрема, із побудови термодинамічної шкали температур на основі законів випромінювання, пірометрії швидкоплинних процесів, діагностики багатокомпонентної плазми, вимірювань теплових потоків. Під його керівництвом створено 3 державні спеціальні еталони температури СРСР; автоматизовані установки для градування і перевірки пірометрів, дослідження спектральних характеристик приймачів випромінювання; вимірювальний комплекс для температурної діагностики у каналах МГД-генераторів; прецизійні пірометри та джерела інтенсивних теплових потоків; радіометри і теплоприймачі тощо, які за своїми метрологічними характеристиками конкурували з аналогами провідних радянських і закордонних центрів. Ці дослідження і технічні рішення стали основою його докторської дисертації, успішно захищеної у 1992 році.

Із набуттям Україною незалежності Л.А. Назаренко активно включається до робіт зі створення Національної еталонної бази. Було розроблено радіометричний метод побудови термодинамічної температурної шкали; створено абсолютний кріогенний приймач, який дозволив на порядок підвищити точність радіаційних вимірювань; запропоновано теорію порожнинного сферичного абсолютного радіометра для еталонних вимірювань оптичної потужності. Під його науковим керівництвом створено національні первинні еталони основних одиниць Міжнародної системи одиниць SI: температури Кельвіна і сили світла — кандели; спеціальні еталони у сфері термометрії, теплофізики, оптико-фізичних вимірювань. У 2002 році Леонід Андрійович у складі авторського колективу став Лауреатом Державної премії України у галузі науки і техніки за роботу «Національна еталонна база України: створення та впровадження в економіку держави».

У 2006—2015 роках Л.А. Назаренко очолював кафедру світлотехніки і джерел світла ХАМГ. Основні зусилля її співробітників він спрямовує не лише на підвищення рівня фахової підготовки студентів і аспірантів, а й на активізацію наукових досліджень, участь у виконанні важливих державних програм.

На кафедрі створюються сучасні лабораторії, які відповідають світовим стандартам. У період впровадження світлодіодів розробляються нові методи фотометрії, які, на відміну від традиційних, дозволили уникати істотних розбіжностей у міжнародних вимірюваннях. Значну увагу приділили підвищенню якості дорожнього освітлення, що зумовлювалося введенням нової системи — мезопічної фотометрії. Колектив кафедри результативно взяв участь у «Національній науково-технічній програмі створення світлодіодних світильників».

Л.А. Назаренко — автор близько 400 наукових праць, винаходів і монографій. Він є членом спеціалізованих вчених рад із захисту дисертацій, редколегій журналів «Український метрологічний журнал», «Метрологія та прилади»; 6 років очолював Технічний комітет «Термометрія й теплофізика» СООМЕТ; за міжнародними угодами працював у провідних світових метрологічних центрах.

Під його науковим керівництвом захищено десятки докторських, кандидатських дисертацій, дипломних робіт, зокрема Леонід Андрійович був науковим керівником дипломної роботи нині чинного Президента Національної академії наук України А.Г. Загороднього, рекомендував його до навчання в аспірантурі Інституту теоретичної фізики НАНУ, директором якого він є сьогодні.

Висока ерудиція та організаторські здібності, принциповість і вимогливість, наполегливість і відповідальність, доброзичливість і доброта, взаємоповага та порозуміння — ось ті якості, які завжди дозволяли Леоніду Андрійовичу Назаренку досягати успіху та приймати оптимальні рішення, здобули йому заслужену повагу як до педагога, так і до вченого-керівника.

Друзі, колеги, співробітники, редакція і редколегія журналу «Метрологія та прилади» щиро вітають Леоніда Андрійовича з ювілеєм! Зичать йому творчої наснаги, нових успіхів у науковій і педагогічній діяльності, здоров'я міцного, щастя без ліку, добробуту та доброго віку!

