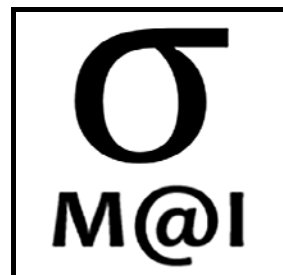




Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National University
of Radio Electronics



Метрологія та прилади

Metrology and Instruments

2025, № 2

2025, No. 2

Щопіврічний науково-практичний журнал

Заснований у 2006 році

У журналі публікуються результати досліджень з теоретичної, законодавчої та прикладної метрології, стандартизації та сертифікації, вимірювання та забезпечення якості, експлуатації та розробки сучасних інформаційно-вимірювальних приладів та систем. Журнал призначений для наукових працівників, викладачів, співробітників калібрувальних та випробувальних лабораторій, докторантів, аспірантів, а також студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

Засновник і видавець:

Харківський національний університет
радіоелектроніки

Кафедра:

Інформаційно-вимірювальних технологій,
пр. Науки, 14, 61166, м. Харків, Україна

Телефон: +38 (057) 702-13-31

E-mail редколегії:

mi@nure.ua

Інформаційний сайт:

<http://mi.nure.ua>

Biannual scientific and practical journal

Founded in 2006

The journal publishes the research study on theoretical, legislative and applied metrology, standardization and certification, measurement and quality assurance, usage and development of modern information and measurement instruments and systems. The journal is intended for researchers, lecturers, employees of calibration and testing laboratories, doctoral students, postgraduate students, and for senior students of the corresponding specialties.

Founder and publisher:

Kharkiv National University
of Radio Electronics

Department:

Information and Measurement Technology
61166, Ukraine, Kharkiv, Nauka ave., 14

Phone: +38 (057) 702-13-31

E-mail of the editorial board:

mi@nure.ua

Information site:

<http://mi.nure.ua>

Затверджений до друку Науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол від 12 грудня 2025 року № 4/6).

Ідентифікатор медіа R30-04584 згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 23.05.2024 № 1772

Включений 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" до категорії Б – наказом Міністерства освіти і науки України №886 від 17.03.2020. (зі змінами від 02.07.20)

Харків • 2025

© Харківський національний університет радіоелектроніки

Редакційна колегія

Головний редактор:

ЗАХАРОВ Ігор Петрович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Члени редакційної колегії:

БАКЛАНОВ Олександр Миколайович
(*д-р хім. наук, проф., Харків, Україна*);
БІК Вальтер
(*д-р фізики, Турін, Італія*);
БОДНАР Ольга
(*д-р наук, Гейтсберґ, США*);
ВАРША Зігмунд
(*д-р філософії, доцент, Варшава, Польща*);
ВІТКОВСЬКИЙ Віктор
(*д-р наук, доцент, Братислава, Словачія*);
ДОРОЖОВЕЦЬ Михайло Миронович
(*д-р техн. наук, проф., Жешув, Польща*);
ДЯКОВ Димитр
(*д-р наук, проф., Софія, Болгарія*);
КОШОВИЙ Микола Димитрович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ЛІРА Ігнасіо
(*д-р філософії, проф., Сантьяго, Чілі*);
МІЛУШЕВ Георгій
(*д-р філософії, доцент, Софія, Болгарія*);
МИГУЩЕНКО РУСЛАН ПАВЛОВИЧ,
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ПЕННЕККІ Франческа
(*д-р філософії, Турін, Італія*);
ПОЛЯРУС Олександр Васильович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
СКУБІС Тадеуш
(*д-р техн. наук, проф., Глівіце, Польща*);
ТРИЩ Роман Михайлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ФОРБС Алістер
(*магістр, Теддінґтон, Велика Британія*);
ЮРЧЕНКО Олег Іванович
(*д-р хім. наук, проф., Харків, Україна*);

Відповідальний секретар:

ДЕГТЯРЬОВ Олександр Валентинович
(*канд. техн. наук, доц., Харків, Україна*).

Editorial board

Editor-in-Chief:

Igor ZAKHAROV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Editorial board members:

Oleksandr BAKLANOV
(*Dr. Sc. (Chem.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Walter BICH
(*Dr. Sc. (Phys.), Turin, Italy*);
Olha BODNAR
(*Dr. Sc., Gaithersburg, USA*);
Zygmunt WARSZA
(*Ph.D, Ass. prof., Warsaw, Poland*);
Viktor WITKOVSKY
(*RNDr., Ass. prof., Bratislava, Slovakia*);
Mykhaylo DOROZHOVETS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Rzeszów, Poland*);
Dimitar DIAKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Sofia, Bulgaria*);
Mykola KOSHOVYI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Ignacio LIRA
(*Ph.D, Prof., Santiago, Chile*);
George MILUSHEV
(*Ph.D, Ass prof., Sofia, Bulgaria*);
Ruslan MYGUSHCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Francesca PENNECCHI
(*Ph.D, Turin, Italy*);
Oleksandr POLIARUS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Tadeusz SKUBIS
(*Dr. Sc., Prof., Gliwice, Poland*);
Roman TRISCH
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Alistair FORBES
(*M. Sc. Teddington, United Kingdom*);
Oleg Yurchenko
(*Dr. Sc. (Chem.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Responsible secretary:
Oleksandr DEGTJARJOV
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine*).

З М І С Т

ЗАГАЛЬНА МЕТРОЛОГІЯ

Варша Зігмунд, Пухальські Яцек
Визначення параметрів еквівалентних схем резисторів та конденсаторів на основі вимірювань їх імпедансно-частотних характеристик (eng.).....5

Павезе Франко
Карти можуть краще, ніж глобальні числові параметри, підтримувати кількісну оцінку особливостей поверхні Землі та їх еволюції в часі (eng.).....14

Полярус О.В., Коваль О.А, Медведовська Я.С., Коваль А.О.
Метод оцінювання шумів в багатоканальній вимірювальній інформаційній системі на основі декомпозиції сингулярних значень матриці даних (eng.).....26

КАЛІБРУВАННЯ

Кондратенко В.О., Новосьолов О.А.
Оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування термометрів інфрачервоного випромінювання.....39

ВИМІРЮВАННЯ

Дегтярьов О.В., Ключник І.І., Хорошайло Ю.Є., Луценко В.О.
Дослідження метрологічних характеристик мультисенсорних систем для вимірювання зовнішніх магнітних полів (eng.).....45

Кошовий М.Д., Костенко О.М., Павлик Г.В., Рожнова Т.Г., Чебикіна Т.В.
Волоконно-оптичні датчики температури та вологості50

Григоренко І.В., Григоренко С.М., Луска С.В., Хроль Д.В.
Метрологічні дослідження вимірювальної системи для молочної промисловості 54

Середюк О.Є., Смаглюк М.В.
Удосконалення інформаційно-вимірювальних систем обліку природного газу на засадах енергетичної цінності 60

Хомяк Ю.В., Дроздова Т.В., Корнеєв І.К., Носков М.С.
Математичне моделювання накладного ортогонального вихрострумовогоперетворювача ..65

TABLE OF CONTENTS

GENERAL METROLOGY

Warsza Zygmunt L., Puchalski Jacek
Determination of equivalent circuit parameters of resistors and capacitors from measurements of their impedance frequency characteristics 5

Franco Pavese
Maps can support quantitative evaluation of Earth's surface features with their evolution in time better than global numerical parameters..... 14

Poliarus O., Koval O., Medvedovska Ya., Koval A.
A method for noise estimation in a multichannel measurement information systems using singular value decomposition of the data matrix.....26

CALIBRATION

Kondratenko V.O., Novosyolov O.A.
Measurement uncertainty evaluation at infrared thermometers calibration..... 39

MEASUREMENT

Degtiarov O.V., Klyuchnyk I.I., Khoroshailo I.Y., Lutsenko V.O.
A study of the metrological characteristics of multisensors system for measuring external magnetic fields 45

Koshovyi M.D., Kostenko O.M., Pavlyk H.V., Rozhnova T.G., Chebykina T.V.
Fiber-optic temperature and humidity sensors..... 50

Hryhorenko I.V., Hryhorenko S.M., Lyska S.V., Khrol D.V
Metrological research of the measuring system for the dairy industry 54

Serediuk O.Ye., Smahliuk M.V.
Improvement of information and measurement systems for natural gas accounting on the basis of energy value 60

Khomyak Y.V., Drozdova T.V., Kornev I.K., Noskov M. S.
Mathematical modeling of a layered orthogonal eddy current conversion 65

**КВАЛІМЕТРІЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЯКОСТІ**

**QUALIMETRY AND QUALITY
ASSURANCE**

Мощенко І.О., Запорожець О.В.

Дослідження ступеня задоволення вимог здобувачів вищої освіти якістю методичного забезпечення освітнього процесу в університетах за допомогою методу QFD 72

Moschenko I.O., Zaporozhets O.V.

Research on the degree of satisfaction of the requirements of higher education applicants with the quality of methodological support of the educational process in universities using the QFD method 72

*Вовк О.В., Чеботарьова І.Б., Донський Д.О.,
Чеботаров Р.І.*

Способи підвищення якості друку для цифрової друкарської машини Konica Minolta 6085 (eng) 82

*Vovk O.V., Chebotarova I.B., Donskiy D.O.,
Chebotarov R.I.*

Methods for improving print quality for Konica Minolta 6085 digital printing press 82

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей
відповідальність несе автор.

DETERMINATION OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS OF RESISTORS AND CAPACITORS FROM MEASUREMENTS OF THEIR IMPEDANCE FREQUENCY CHARACTERISTICS

Zygmunt L. Warsza¹, Jacek Puchalski²

*Polish Metrological Society, Warszawa, Poland
Central Office of Measures GUM, Warszawa, Poland*

Abstract

The paper presents a method for determining parameters of equivalent circuits of resistors and capacitors as connection of two-terminal elements with single linear resistance, inductance or capacitances. The values and uncertainties of these parameters are estimated using the least squares method for measurements of the frequency characteristic of the module of impedance. This task is mathematically complicated, because usually you get a system of nonlinear equations, which is not analytically solvable. To obtain linear equations, it was proposed to use the method by changing variables. This method was previously developed by authors for the regression of nonlinear functions and has already been successfully used in metrological tasks.

Key words: equivalent circuits, resistance, capacitance, inductance, frequency characteristic, module of impedance.

1. Introduction

In the design and manufacture of electronic circuits, it is necessary to know the basic parameters of the equivalent circuits of the components used in them, including resistors, capacitors and inductors. Determining these parameters on the basis of measurements of frequency characteristics of passive components, even for their simplified equivalent circuits with ideal resistances, capacitances and inductances, is a complicated task. A system of nonlinear equations is obtained, which usually has no analytical solutions. In the literature on the analysis of equivalent schemes of these elements, no methods for estimating the values and uncertainties of indirect measurement results described by nonlinear functions have been used, e.g. [2-6].

Equivalent diagrams of a resistor and a capacitor with 5 ideal linear single-parameters as resistance R , inductance L and capacitance C were considered by Kubis and Warsza in papers [7-13]. From measurements of the modulus of impedance of these schemes at several frequencies, they determined values of their 5 parameters using the numerical Monte Carlo method, but without assessing uncertainty.

To determine the values and uncertainties of the parameters of the equivalent schemes of passive elements, we propose the use of a method with linearization of functions by changing their variables. It simplifies the process of metrological analysis of systems. The authors presented and discussed this method at several applications in metrology and measurement technology at previous national conferences PPM and MKM and international conferences MathMet, AMCTM XII and at the IMEKO Congress, and also published [14-22]. This method will be used below to determine the values and to evaluate the accuracy of the linear parameters of the simplified equivalent scheme of the

resistor with only three parameters R, L, C and the square impedance components of the capacitor with two capacitances and three resistances.

The examples will use the results of measurements of the impedance module of both passive components for $n = 10$ frequencies. For the resistor, the frequency responses, nominal and adjusted to the parameters of the system (WTLS) with an uncertainty corridor and three parameters of the schematic will be determined. For the capacitor, the resistive and reactance components of its impedance are matched, and their uncertainties are determined by the law of propagation LPU.

2. Description of the variable-change linearization method

In the linearization method described below, for a nonlinear function $y = f(x)$ a linear equation is created in new Cartesian coordinates ξ, ψ , which takes the form of

$$\psi(y, \boldsymbol{\beta}) = \theta_1 \xi(x, \boldsymbol{\beta}) + \theta_0. \quad (1)$$

After changing the coordinates x, y on ξ, ψ can be adjusted the parameters of the equation (1) using the linear regression (1) to the measurement data of the tested points according to the criterion WTLS least squares. All parameters of the fitted curve are given by the vector $\boldsymbol{p} = [\theta_1, \theta_0, \boldsymbol{\beta}]^T$. A criterion function is specified by errors in the new coordinates denoted by n -dimensional vectors $\Delta \boldsymbol{\xi}$ and $\Delta \boldsymbol{\psi}$ by the covariance matrix \boldsymbol{U} size of $2n \times 2n$:

$$\phi_{\xi\psi} = \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\xi} \\ \Delta \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}^T \boldsymbol{U}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\xi} \\ \Delta \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}, \quad (1a)$$

where: \boldsymbol{U} is the symmetric covariance matrix for the new coordinates ξ and ψ .

This matrix is formed by both sides' multiplication of the covariance matrix for x and y by diagonal matrices of first n elements as derived values $\xi'(x, \beta)$ and about the next n elements $\psi'(y, \beta)$. Inverse covariance matrix U^{-1} denoted by elements of this quadratic matrixes U_{11}, U_{12} i U_{22} , size of $n \times n$ i.e.

$$U^{-1} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{12}^T & U_{22} \end{bmatrix}. \quad (1b)$$

A minimum search is a state in new coordinates that meets the following conditions:

$$\nabla_{\xi_p} \phi_{\xi\psi} = \frac{\partial \phi_{\xi\psi}}{\partial \Delta \xi} = 0, \quad \frac{\partial \phi_{\xi\psi}}{\partial \theta_1} = 0 \text{ and } \frac{\partial \phi_{\xi\psi}}{\partial \theta_0} = 0. \quad (2a, b, c)$$

The first of these conditions only is analytically solvable. The local minimum of the inverse of the effective covariance matrix can be obtained for:

$$U_{Yeff}^{-1} = U_{22} - (U_{12}^T + aU_{22}) T^{-1} (U_{12} + aU_{22}), \quad (3)$$

where $T = U_{11} + \theta_1(U_{12}^T + U_{12}) + \theta_1^2 U_{22}$.

Effective inverse covariance matrix U_{Yeff}^{-1} is diagonal when it is assumed that correlations occur only between coordinates at measurement points with a correlation coefficient ρ . Then the diagonal elements of U_{Yeff} specifying the variance (the square of the effective uncertainty) are given by the expression:

$$u_{eff}^2 = \theta_1^2 u^2(\xi) - 2\theta_1 \rho u(\xi)u(\psi) + u^2(\psi), \quad (4)$$

where $u(\xi) = |\xi'(x, \beta)|u(x)$; $u(\psi) = |\psi'(y, \beta)|u(y)$.

The criterion function is quasi-quadratic, i.e.:

$$\phi_{\psi\xi}(\theta_1) = \theta_1^2 \left(S_{\xi\xi} - \frac{S_{\xi\xi}^2}{S} \right) + 2 \left(\frac{S_{\xi\psi}}{S} - S_{\xi\psi} \right) \theta_1 + S_{\psi\psi} - \frac{S_{\psi\psi}^2}{S}, \quad (5)$$

where: $S = \mathbf{1}^T U_{eff}^{-1} \mathbf{1} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [u_{Yeff}^{-1}]_{ij} > 0$,

$$S_{\xi} = \xi^T U_{Yeff}^{-1} \mathbf{1} = \mathbf{1}^T U_{Yeff}^{-1} \xi, \quad S_{\xi\xi} = \xi^T U_{Yeff}^{-1} \xi,$$

$$S_{\psi} = \psi^T U_{Yeff}^{-1} \mathbf{1} = \mathbf{1}^T U_{Yeff}^{-1} \psi, \quad S_{\psi\psi} = \psi^T U_{Yeff}^{-1} \psi,$$

and $\theta_0 = (S_{\psi} - \theta_1 S_{\xi})/S$.

Vectors ξ, ψ about the size $n \times 1$ are determined by the coordinates of the measurement points $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_n]^T, \mathbf{Y} = [y_1, \dots, y_n]^T$ through transformations of functions $\xi(x, \beta), \psi(y, \beta)$ with initial input parameters $\beta = \beta_0$. It is also assumed that random variables x and y are not correlated. In cases where the β is a one-dimensional vector with the value β , a two-dimensional criterion function is obtained. A typical chart of this chart is shown in Fig. 1.

A general flowchart for the determination of the standard and extended uncertainty for the parameterized curve is given in Fig. 2. In the first phase, the parameters of the curve are adjusted using the least squares method, assuming that both the coordinates of the measurement points and the covariance matrix are known, in the second phase, by numerical

differentiation of the curve parameters, the covariance matrix of the parameters is determined.

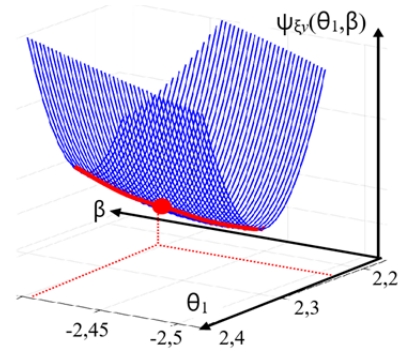


Fig. 1. Graph of typical criterion function in two-dimensional input area θ_1, β

From the analytical derivatives with respect to the parameters of the parameterized curve, the coverage interval at each point of the adjusted curve is obtained.

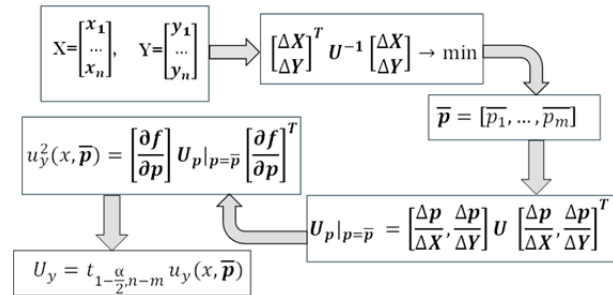


Fig. 2. Scheme for determining the least squares fit uncertainty corridor

This diagram shows that it is possible to determine the standard and expanded uncertainty at any point in the curve to be fitted. Uncertainty of all m -parameters $p = [p_1, \dots, p_m]^T$ shall be estimated according to the Law of Propagation of Uncertainty (LPU), as the product of the input covariance matrix (generally of the size $2n \times 2n$) U_{in} is multiplied by both sides of the matrix C including the sensitivity coefficients (generally of the size $m \times 2n$):

$$U_p = C U_{in} C^T. \quad (6)$$

The sensitivity coefficients, as the first derivatives, are calculated by numerical differentiation of each parameter $p_i (i = 1, \dots, m)$ according to all input quantities (generally there are $2n$ differences for each measurement point x_i, y_i). The first derivatives are estimated from the formula:

$$C_{ij} = \frac{\partial p_i}{\partial z_j} \approx \frac{p_i(z_j + \Delta z_j) - p_i(z_j - \Delta z_j)}{2\Delta z_j}, \quad (7)$$

where: $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, 2n$, whereas z_j is one of the coordinates of the measurement (x_j, y_j) .

The increment values are selected to meet the requirements for assessing the values of the first derivatives with respect to Δz_j for $\Delta z_j \ll z_j$. When all

parameters are directly the actual parameters of the curve to be fitted, then the standard and extended uncertainty is obtained from the LPU:

$$u_y^2(x) = \mathbf{S}U\rho\mathbf{S}^T \text{ and } U = t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-m} u_y, \quad (8a,b)$$

where $\mathbf{S} = [\frac{\partial y}{\partial p_1}, \dots, \frac{\partial y}{\partial p_m}]$ is a vector with a size of $1 \times m$ containing the sensitivity coefficients.

The sensitivity coefficients are determined analytically as the first partial derivatives with respect to the parameters of the system with matched values and for selected values x .

The diagram in fig. 2 does not include the method of changing variables used in the analyzed examples, described above. This method simplifies the adjustment of the parameters of the curve described by the nonlinear function, because in the new variables, when the least squares criterion is used, the criterion function is minimized.

The equation describing the curve in the new variables is equivalent to the equation in the original coordinates x and y . The values of a criterion function in the new variables are close to the original values of this function if both new variables are dependent individually on the original variables according to formula (1). If each of the new variables depends on both primitive coordinates, then the new values will be different from those for the primitive variables.

3. Parameters of the resistor and their uncertainties

The subject of the research will be parameters of the real resistor equivalent circuit shown as diagram in fig. 3. This circuit consists of two parallel branches. In the upper one there is a resistance R and two equal inductances L connected in series with it, each with an imaginary component of the impedance $j\omega L$. The impedance of this branch is $2j\omega L + R$ and it is connected in parallel with a capacitor with capacitive reactance $1/j\omega C$.

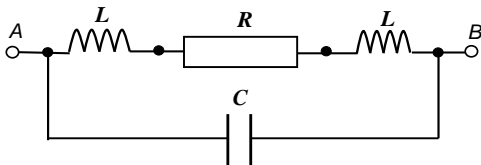


Fig. 3. Equivalent diagram of the resistor under test

The complex impedance \mathbf{Z} the two terminals A B circuit replacing the actual resistor is:

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{2j\omega L + R}} = \frac{2j\omega L + R}{1 - 2\omega^2 LC + j\omega RC}. \quad (9)$$

Square of the module $|\mathbf{Z}|$ of impedance \mathbf{Z} is described by the expression

$$|\mathbf{Z}|^2 = \frac{4\omega^2 L^2 + R^2}{(1 - 2\omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2}. \quad (10)$$

The following transformations will be performed: multiplying both sides of the equation (10) by the denominator of the left side of equation (9), transferring the term $|\mathbf{Z}|^2 \omega^2 R^2 C^2$ to the right side and dividing both sides, by the $1 - |\mathbf{Z}|^2 \omega^2 C^2$. This gives a linear equation in the new coordinates of the form:

$$\psi = \Theta_1 \xi + \Theta_0, \quad (11)$$

where: $\Theta_0 = R^2$, $\Theta_1 = L$, and for $1 - |\mathbf{Z}|^2 \omega^2 C^2 \neq 0$ new variables ψ , ξ are defined as follows:

$$\xi(\omega, |\mathbf{Z}|, C) = \frac{4\omega^2 L}{1 - |\mathbf{Z}|^2 \omega^2 C^2},$$

$$\psi(\omega, |\mathbf{Z}|, L, C) = \frac{|\mathbf{Z}|^2 (1 - 2\omega^2 LC)^2}{1 - |\mathbf{Z}|^2 \omega^2 C^2}. \quad (11a,b)$$

From measurements of the impedance module $|\mathbf{Z}|_i$ at n points with a frequency $\omega_i = 2\pi f_i$ (specified for f_i), parameters R, L, C of the equivalent circuit shall be determined. The parameter to be adjusted is $\beta = C$, at the characteristics of the criterion function are deleted $\Phi_{\xi\psi}(\Theta_1)$ containing the local minimum.

Uncertainties of new variables ξ and ψ depend on the impedance module $|\mathbf{Z}|$, on the frequency of $\omega = 2\pi f$ and on the correlation between them determined by the coefficient ρ . They are determined from the LPU uncertainty propagation law in the formula:

$$\begin{bmatrix} u^2(\xi) & \rho u(\xi)u(\psi) \\ \rho u(\xi)u(\psi) & u^2(\psi) \end{bmatrix} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} u^2(\omega) & 0 \\ 0 & u^2(|\mathbf{Z}|) \end{bmatrix} \mathbf{G}^T, \quad (12)$$

where: \mathbf{G} – is the Jacobian matrix of first derivatives – i.e. the sensitivity coefficients and is of the form

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \partial \xi / \partial f & \partial \xi / \partial |\mathbf{Z}| \\ \partial \psi / \partial f & \partial \psi / \partial |\mathbf{Z}| \end{bmatrix}. \quad (13)$$

The uncertainties of the new variables are:

$$u(\xi) = \frac{8\omega L}{(1 - |\mathbf{Z}|^2 \omega^2 C^2)^2} \sqrt{u^2(\omega) + u^2(|\mathbf{Z}|) |\mathbf{Z}|^2 \omega^6 C^4},$$

$$u(\psi) = \frac{2|\mathbf{Z}| |1 - 2\omega^2 LC|}{(1 - |\mathbf{Z}|^2 \omega^2 C^2)^2} [u^2(|\mathbf{Z}|) (1 - 2\omega^2 LC)^2 + u^2(\omega) \omega^2 C^2 |\mathbf{Z}|^2 (|\mathbf{Z}|^2 C (1 + 2\omega^2 LC) - 4L)^2]^{0.5}. \quad (14 a,b)$$

The covariance part containing the correlation coefficient is of the form:

$$\rho u(\psi)u(\xi) = \frac{16(1 - 2\omega^2 LC)\omega^2 |\mathbf{Z}|^2 LC}{(1 - |\mathbf{Z}|^2 \omega^2 C^2)^4} [u^2(|\mathbf{Z}|) \omega^2 C (1 - 2\omega^2 LC) + u^2(\omega) (|\mathbf{Z}|^2 C (1 + 2\omega^2 LC) - 4L)]. \quad (15)$$

Used in (4) effective inverse covariance matrix $\mathbf{U}_{Y_{eff}}^{-1}$ is diagonal and the effective measurement uncertainty is given in the formula:

$$u_{eff}^2 = \theta_1^2 u^2(\xi) - 2\theta_1 \rho u(\xi)u(\psi) + u^2(\psi). \quad (16)$$

The nominal values of the equivalent circuit parameters are as follows: $L = 1$ nH, $C = 350$ pF, $R = 1$ Ω , the data obtained from the measurements are presented in Table 1.

Table 1 – Values of measured frequencies and impedances at the measuring points

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , MHz	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280
$ Z $, Ω	3.93	4.87	5.81	6.2	5.76	5.0	4.23	3.62	3.13	2.75

The standard frequency uncertainty is $u(f) = 1/\sqrt{3}$ Hz and the impedance module $|Z|$ is measured with relative uncertainty $\delta(|Z|) \approx 2\%$.

Standard uncertainties for three parameters $v = [R, L, C]$ estimate by law their propagation LPU

$$u^2(v) = \sum_{i=1}^n u^2(f_i) \left(\frac{\partial v}{\partial f} \Big|_{f=f_i} \right)^2 + u^2(|Z|_i) \left(\frac{\partial v}{\partial |Z|} \Big|_{|Z|=|Z|_i} \right)^2 \quad (17)$$

where the sensitivity coefficients $\frac{\partial v}{\partial f}$ and $\frac{\partial v}{\partial |Z|}$ are determined numerically.

As a result of parameter matching $\beta = C$ charts received $\Phi_{\xi\psi}(\theta_1)$ quasi-quadratic criterion function, where the global minimum is estimated approximately as $\Phi_{\xi\psi_{\text{globalmin}}} \approx 0,182$ for $L \approx 0,992$ nH. It is being shown on Fig. 4.

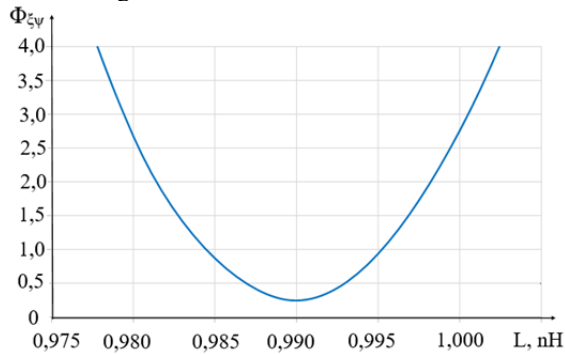


Fig. 4. Variable-dependent criterion function $\theta_1 = L$

Parameter value $\beta = C$ corresponding to the global minimum of $C = 352$ pF. The matched value received $C = 0,985 \Omega$.

Calculations of mean values of parameters are performed in EXCEL and in the R environment, and in addition, the covariance matrix, correlator matrix and uncertainty are obtained from a properly prepared script in R. From the numerical experiment the matrix U_p Matching parameters of the form:

$$U_p = \begin{bmatrix} 1,91 \cdot 10^{-4} \Omega^2 & 4,09 \cdot 10^{-14} \Omega\text{H} & 1,03 \cdot 10^{-14} \Omega\text{F} \\ 4,09 \cdot 10^{-14} \Omega\text{H} & 4,3 \cdot 10^{-23} \text{H}^2 & 1,4 \cdot 10^{-23} \text{HF} \\ 1,03 \cdot 10^{-14} \Omega\text{F} & 1,4 \cdot 10^{-23} \text{HF} & 6 \cdot 10^{-24} \text{F}^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

and is bound to the correlator matrix

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 0,45 & 0,3 \\ 0,45 & 1 & 0,9 \\ 0,3 & 0,9 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

From this correlator matrix, it follows that inductance and capacitance (0,9) are positively correlated, followed by inductance with resistance (0,45) and resistance with capacitance correlate weakly (0,3). Diagonal elements of a matrix U_p are squares of standard uncertainties and hence they follow:

$$R = 0,985 (0,0138) \Omega, (1,4\%);$$

$$L = 0,992(0,0066) \text{ nH} (0,66\%);$$

$$C = 352 (2,44) \text{ pF} (0,7\%).$$

The uncertainty of standard parameters of the equivalent resistor scheme and their mutual correlations also results in the standard uncertainty of the frequency response corridor and the expanded uncertainty $u^2(|Z|(\omega)) = \mathbf{S} U_p \mathbf{S}^T$, $U(|Z|(\omega)) = t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-m} u(|Z|(\omega))$.

Assumed is: $\alpha = 0,05$, $n = 10$, $m = 3$, $t_{1-\frac{0,05}{2}, 10-3} = 2,36$.

The elements of the vector were also determined, which are analytical partial derivatives of the impedance modulus and sensitivity coefficients $\mathbf{S} = \left[\frac{\partial |Z|}{\partial R}, \frac{\partial |Z|}{\partial L}, \frac{\partial |Z|}{\partial C} \right]$ with the following formulas:

$$\frac{\partial |Z|}{\partial R} = \frac{R(1 - 4\omega^2 LC)}{Z'}$$

$$\frac{\partial |Z|}{\partial L} = \frac{2\omega^2(2L - 4\omega^2 L^2 C + R^2 C)}{Z'}$$

$$\frac{\partial |Z|}{\partial C} = -\frac{\omega^2(4\omega^2 L^2 + R^2)(R^2 C - 2L + 4\omega^2 L^2 C)}{Z'} \quad (20a,b,c)$$

where

$$Z' = |Z|[(1 - 2\omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2]^2 \quad (21)$$

Figure 5 shows respectively: measurement points, the nominal and matched frequency response of the impedance module $|Z|$ with corridors of standard uncertainty $u(|Z|)$ and expanded uncertainty $U(|Z|)$.

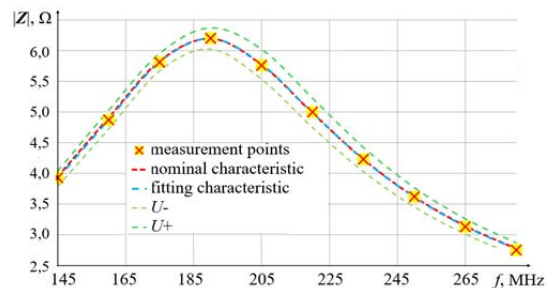


Fig. 5. Measuring points, nominal and matched impedance frequency responses

Figure 6 shows the fitting errors and the standard and expanded uncertainty corridors in relative units for the impedance modulus $|Z|$ as a function of frequency with measurement points.

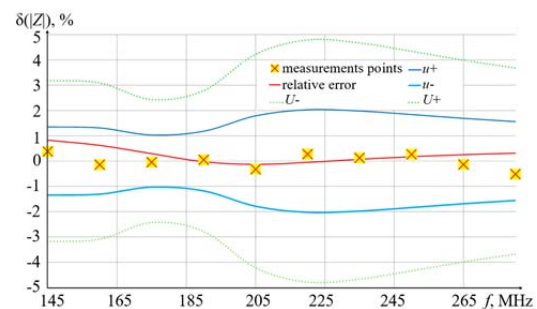


Fig. 6. Standard and expanded coverage corridor relative uncertainty and relative error

The uncertainty corridor of the impedance module $|Z|$, over the entire range of characteristics under study varies from 2,5 % to less than 5 %. Its narrowest width occurs for the rising edge of the impedance modulus, i.e. for about 170 MHz, and the widest – for about 220 MHz, i.e. after reaching the maximum value for the falling edge of the characteristic.

4. Determination of capacitor model parameters from impedance components

The multi-element equivalent circuits are used in modeling and descriptions of frequency changes of components' impedance. Such a scheme with three ideal resistances and two capacitances is on the figure 7.

Values R, C do not depend on the frequency. It is used for AC in the frequency range of 10 Hz to 10 GHz. Monte Carlo tests with it was made for the range 10Hz - 100 kHz in works [7-13].

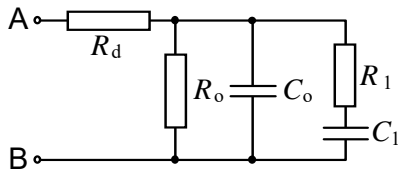


Fig. 7. Diagram of capacitor replacement circuit

Impedance Z the two ports A B for each frequency is described in complex numbers as:

$$Z = ReZ + jImZ, \quad (22)$$

where components: resistance ReZ and capacitive reactance $ImZ = -1/\omega C$.

Impedance Z between two-terminals AB shall be measured directly or shall be determined from the voltage U_{AB} , current I_{AB} and the angle of their phase difference at each given frequency.

In our considerations parameters of the capacitor model were adjusted to the results of measurements of alternating current components with five frequencies using the least squares method. Then numbers of the measured points and their parameters are $n = 10$ and $m = 5$. The results are given in Table 2.

Table 2 – Measurement data of frequency and corresponding impedance components of the resistor and capacitor schemes

Lp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , Hz	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}
ReZ , k Ω	508,3	65,61	1,107	0,0113	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
C , nF	8,476	6,006	5,015	5,000	5,0005	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000

The capacitor equivalent circuit from Fig. 7 contains a resistance R_d connected in series with parallel connected resistance R_0 , capacity C_0 and branch of connected in serial C_1 and R_1 , i.e. of impedance

$$R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{1+j\omega R_1 C_1}{j\omega C_1}.$$

Hence

$$\frac{1}{ReZ - R_d + jImZ} = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{j\omega C_1}{1 + j\omega R_1 C_1}. \quad (23)$$

After transforming the terms into complex numbers, i.e. after multiplying the denominators and numerators by conjugating expressions to their denominators, we get

$$\frac{ReZ - R_d}{(ReZ - R_d)^2 + ImZ^2} - j \frac{ImZ}{(ReZ - R_d)^2 + ImZ^2} = \frac{1}{R_0} + \frac{\omega^2 C_1^2 R_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} + j\omega \left(C_0 + \frac{C_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} \right). \quad (24)$$

The equality of the real and imaginary components of both sides of the expression (24) results in two equations:

$$\frac{ReZ - R_d}{(ReZ - R_d)^2 + ImZ^2} = \frac{1}{R_0} + C_1 \frac{\omega^2 C_1 R_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2}$$

$$- \frac{ImZ}{\omega (ReZ - R_d)^2 + ImZ^2} = C_0 + C_1 \frac{1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2}. \quad (25a,b)$$

The equations (25a,b) in the new variables are linear with the parameters $\beta_1 = R_1$ and $\beta_2 = R_d$, i.e.:

$$\psi_1(\beta_2) = \frac{1}{R_0} + C_1 \xi_1(\beta_1)$$

and

$$\psi_2(\beta_2) = C_0 + C_1 \xi_2(\beta_1) \quad (26a,b)$$

The abscissa and elevations in the new variables are as follows:

$$\xi_{1i} = \frac{\omega_i^2 C_1 \beta_1}{1 + \omega_i^2 \beta_1^2 C_1^2}$$

and

$$\xi_{2i} = \frac{1}{1 + \omega_i^2 \beta_1^2 C_1^2}; \quad (27a,b)$$

$$\psi_{1i} = \frac{ReZ_i - \beta_2}{(ReZ_i - \beta_2)^2 + ImZ_i^2}$$

and

$$\psi_{2i} = \frac{-ImZ_i/\omega_i}{(ReZ_i - \beta_2)^2 + ImZ_i^2}. \quad (28a,b)$$

From the law of error propagation follows the propagation of uncertainty according to LPU:

$$u(\xi_{1i}) = \frac{2C_1\beta_1\omega_i}{(1 + \omega_i^2\beta_1^2C_1^2)^2} u(\omega_i),$$

$$u(\xi_{2i}) = \frac{2C_1^2\beta_1^2\omega_i}{(1 + \omega_i^2\beta_1^2C_1^2)^2} u(\omega_i) = C_1\beta_1 u(\xi_{1i}),$$

$$u(\psi_{1i}) = \frac{1}{[(ReZ_i - \beta_2)^2 + ImZ_i^2]^2} *$$

$$* \{ [ImZ_i^2 - (ReZ_i - \beta_2)^2] u^2(ReZ_i) + 4ImZ_i^2(ReZ_i - \beta_2)^2 u^2(ImZ_i) \}^{0,5}; \quad (29a,b)$$

$$u(\psi_{2i}) = \frac{1}{\omega_i[(ReZ_i - \beta_2)^2 + ImZ_i^2]} * \\ * \{ImZ_i^2[(ReZ_i - \beta_2)^2 + ImZ_i^2]u^2(\omega_i)/\omega_i^2 + \\ + 4(ReZ_i - \beta_2)^2 ImZ_i^2 u^2(ReZ_i) + \\ + [(ReZ_i - \beta_2)^2 - ImZ_i^2]u^2(ImZ_i)\}^{0.5}. \quad (29c,d)$$

Assuming that measurements of both components are subject to uncertainties $\delta(ReZ_i), \delta(ImZ_i) < 1\%$ ($i = 1, \dots, n$) and that the uncertainty of frequency measurement $u(f) < 0,58$ Hz, criterion functions are obtained $\phi_1(C_1), \phi_2(C_1)$ shown in figure 8. They are determined from formula (4), for matrices inverse to effective covariance matrices for uncorrelated input quantities as $u_{eff}^2 = \theta_1^2 u^2(\xi) + u^2(\psi)$. New variables ξ_1, ψ_1 and ξ_2, ψ_2 , despite that ξ_2 and ψ_2 depend on the ω , they are practically uncorrelated.

The global minimum shall be obtained for $\beta_1 = R_1 = 1$ M Ω and $\beta_2 = R_d = 0,2$ Ω . Number of measurement points $n = 10$, and number of parameters $m = 5$. Received:

- minimum values of criterion functions $\phi_{1min}(C_1) < 0,015, \phi_{2min}(C_1) < 0,0001$;
- adjusted parameter values: $C_1 = 3$ nF, $C_0 = 5,000055$ nF, $R_0 = 9,999608$ M Ω .

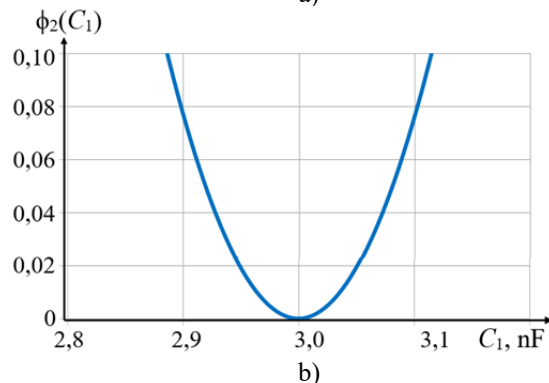
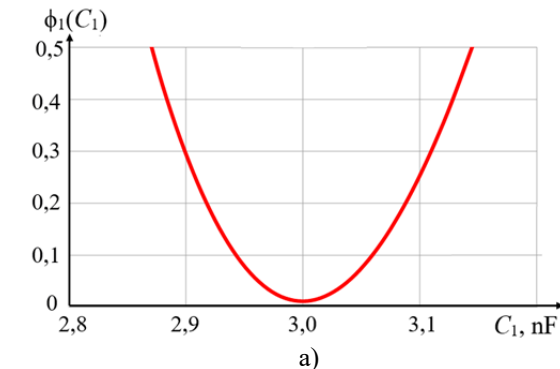


Fig. 8. Graphs a) and b) of the criterion function for equations (26a) and (26b)

The uncertainties and correlations between quantities are due to the law of propagation of the uncertainty of the covariance matrix U_p quantities, i.e. for the parameters of the:

$$U_p(C_1, R_0, C_0, R_d, R_1) = CU_{in}C^T. \quad (30)$$

Diagonal matrix U_{in} has a size $3n \times 3n$. For uncorrelated input quantities, it contains the following squares of uncertainty as elements: $u^2(f_i)$ for frequencies, $u^2(ReZ_i)$ for the actual impedance component and $u^2(ImZ_i)$ for the imaginary impedance component. Matrix C sensitivity ratios of size $m \times 3n$ is the matrix of Jacobian. It is obtained by numerical differentiation of all parameters $m = 5$ due to $3 \times n$ input values. Symbolically, this is written as

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial C_1}{\partial f_n} & \frac{\partial C_1}{\partial Re|Z|_1} & \dots & \frac{\partial C_1}{\partial Re|Z|_n} & \frac{\partial C_1}{\partial Im|Z|_1} & \dots & \frac{\partial C_1}{\partial Im|Z|_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial R_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial R_1}{\partial f_n} & \frac{\partial R_1}{\partial Re|Z|_1} & \dots & \frac{\partial R_1}{\partial Re|Z|_n} & \frac{\partial R_1}{\partial Im|Z|_1} & \dots & \frac{\partial R_1}{\partial Im|Z|_n} \end{bmatrix}.$$

Parameter covariance matrix $U_p(C_1, R_0, C_0, R_d, R_1)$ is both sides product of the correlator V and matrix Q size of 5×5 , i.e.:

$$U_p = Q^T V Q, \quad (30b)$$

where

$$Q = \begin{bmatrix} u(C_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u(R_0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u(C_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u(R_d) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u(R_1) \end{bmatrix}.$$

From this relationship, the values of the elements of the correlator matrix are obtained V described in the form of table 3.

Table 3 – Correlator matrix V data

	C_1	R_0	C_0	R_d	R_1
C_1	1	0,69	0,08	-0,013	0,22
R_0	0,69	1	-0,25	-0,02	0,64
C_0	0,08	-0,25	1	0,035	-0,46
R_d	-0,013	-0,02	0,035	1	-0,023
R_1	0,22	0,64	-0,46	-0,023	1

Table 3 shows that measurements of impedance components as a function of frequency lead to a strong positive correlation between the resistance R_0 and capacity C_1 (0.69), resistances R_0 and R_1 (0.64) and to the weak correlation between the capacity of the C_1 and resistance R_1 (0.22). A negative correlation occurs between the capacity of the C_0 and resistance R_1 (-0.46) and as weaker for capacity C_0 with resistance R_0 (-0.25). The other pairs of elements are practically uncorrelated.

The uncertainties of elements of the capacitor equivalent diagram are described by the formula:

$$u^2(w) = \sum_{i=1}^n [u^2(f_i) \left(\frac{\partial w}{\partial f} \Big|_{f=f_i} \right)^2 + \\ + u^2(ReZ_i) \left(\frac{\partial w}{\partial ReZ} \Big|_{ReZ=ReZ_i} \right)^2 + \\ + u^2(ImZ_i) \left(\frac{\partial w}{\partial ImZ} \Big|_{ImZ=ImZ_i} \right)^2], \quad (31)$$

where: $w = \{C_1, R_0, C_0, R_d, R_1\}$

The results of measurements of the elements of the equivalent diagram along with their uncertainties are as follows:

$C_0 = 5,000055(0,017) \text{ nF (0,34\%);}$
 $R_0 = 9,9996 (0,78) \text{ M}\Omega (7,8\%);$
 $C_1 = 3(0,19) \text{ nF (6,33 \%);}$
 $R_1 = 1(0,016) \text{ M}\Omega (1,6 \%);$
 $R_d = 0,2 (0,0015) \Omega (0,75\%).$

The standard uncertainty of the impedance module, i.e. the width of its coverage corridor, is calculated from the uncertainty propagation law as:

$$u^2(|Z|(\omega)) = \mathbf{S}U_p\mathbf{S}^T, \quad (32)$$

where: sensitivity vector \mathbf{S} size of $1 \times m$ is derived analytically – see Appendix A.

The expanded uncertainty is described by the formula:

$$U(|Z|(\omega)) = t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-m} u(|Z|(\omega)). \quad (33)$$

In the numerical experiment discussed here, the: $\alpha = 0,05, n = 10, m = 5, t_{1-\frac{0,05}{2}, 10-5} = 2,57.$

The frequency characteristics of impedance on the logarithmic, nominal and fit scales, together with the measurement points and additionally relative errors, are given in Figures 9, 10 and 11. Figure 11 shows that the width of the aisle (expanded uncertainty) is slightly below 1% in the range $5 \cdot (10^2 - 10^8) \text{ Hz}$. At the beginning of the measurement range, the width is the largest and decreases from slightly above 5% to 1% in the range from 10 Hz to 500 Hz. In the range from 100 MHz to 1 GHz it increases from 1% to 2% and up to 10 GHz it is at 2% of the value of the impedance module.

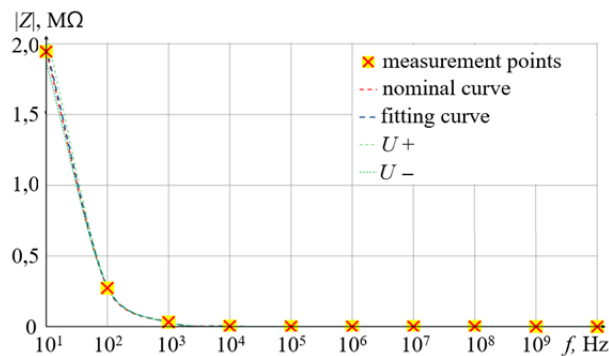


Fig. 9. Frequency impedance characteristics of the capacitor model with measurement points as nominal and fit curves (logarithmic scale on the frequency axis)

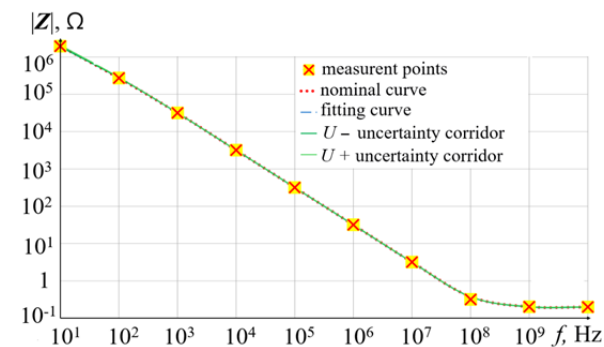


Fig. 10. Log-log frequency response of capacitor schematic impedance

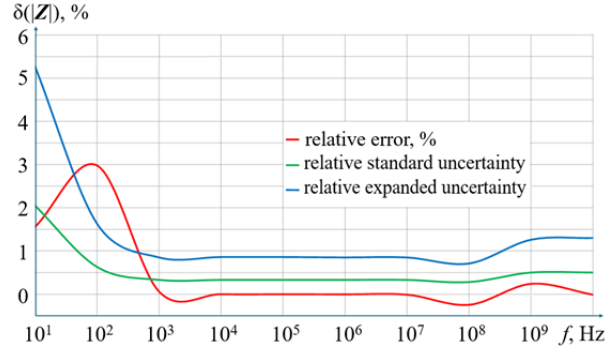


Fig. 11. Relative standard errors and the standard and expanded relative uncertainty of the impedance measurement of the capacitor equivalent diagram (logarithmic frequency scale).

5. Summary

This article introduces a method for fitting nonlinear curves to the data for measured points. It uses the change of variables to obtain linear relationships fitted according to the weighted least squares criterion of WTLS. After changing the variables in this way, you can also use straight line regression. The uncertainty of the coordinates of the measurement points is also considered, as well as their correlations, if they occur in the measurements.

The condition for using this method approximates the propagation of errors and measurement uncertainty, acceptable in metrology, using the first derivative of the transformation function. If the points under study are not too far from the nonlinear sought function, and the uncertainty of the data measurement is not too high, e.g. below 5%, then this method can be used successfully. The limitations are therefore the same as estimating the accuracy of measurements by the international GUM guide [1].

The method also allows to determine the uncertainty corridor for a nonlinear function fitted to the measurement data. It has already been used in the authors' papers [14-20] for several different examples of measurements with the change of one and both coordinates of a nonlinear function. Computational examples of fitting various nonlinear functions to given measurement points, including implicit functions, are presented. They showed that the method of changing variables is universal if the new variables are properly selected.

In literature, e.g. [2-6], simple examples of linearization of the function describing measurements are usually considered. There was no discussion of the method of fitting nonlinear functions with linearization by changing variables, nor a discussion of how to determine the boundaries of their uncertainty band without correlation and with correlations.

The examples considered in this paper use the results of measurements of the impedance module of resistor and capacitor equivalent circuits in $n=10$ frequencies. From them, the frequency characteristics of the impedance module were determined, nominal and

adjusted to the parameters of the system using the WTLS method along with its uncertainty corridor. For the capacitor, the resistive and reactance components of the impedance of its equivalent scheme were matched and their uncertainties were determined using the law of their propagation, i.e. the LPU method.

The method used in this work for nonlinear functions can be fully useful in measurement practice. It is also worth considering the possibility of using it in the internationally developed extended version of the GUM guide.

References

1. JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Sevres, France: International Bureau of Weights and Measures BIPM), and its Supplements.
2. Levenberg K. (1944). A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares // Quarterly of Applied Mathematics. 2 (2) 164-168 doi:10.1090/qum/10666.
3. Marquardt D. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM Journal on Applied Mathematics. 11 (2): 431-41 doi:10.1137/0111030.
4. Dennis J.E., Jr., Schnabel R.B. (1983). Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations // SIAM 1996 reproduction of Prentice-Hall 1983.
5. Draper R.D., Smith H., (1998) Applied Regression Analysis 3rd Ed., J. Wiley, New York.
6. Madsen K., Nielsen H.B., Tinglef (2004), Method for Non-Linear Least Squares Problems, 2nd Edition. April 2004. Technical University of Denmark.
7. Kubisa S., Warsza Z. L. Uogólniony opis właściwości częstotliwościowych rezystorów // Elektronika, 3/2016 s.31-38 DOI: 10.15199/13.2016.3.1.
8. Kubisa S., Warsza Z.L. Analiza błędów częstotliwościowych rezystorów. Część 1. Modele rezystorów przy prądzie przemiennym i ich parametry // Przegląd Elektrotechniczny 6/2016 s. 211-216.
9. Kubisa S., Warsza Z.L. Analiza błędów częstotliwościowych rezystorów. Część 2. Korekcja częstotliwościowa impedancji rezystorów i jej skuteczność // Przegląd Elektrotechniczny 7/2016, 197-201.
10. Kubisa S., Warsza Z. L. The frequency analysis of real resistors in relative values // Measurement Automation Monitoring (MAM 2016) vol. 62, no 03, s. 80-86.
11. Kubisa S., Warsza Z. L. Generalized description of the frequency characteristics of resistors // SCIT 2016 Recent Advances in Systems, Control, and Information Technology. (Editors: R. Szewczyk et al), vol. 543, series: Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Int. Publ.2017, 630-644, DOI 10.1007/978-3-319-48923-0_67.
12. Kubisa S., Warsza Z. L. Identification of parameters of the capacitor equivalent scheme using Monte Carlo methods. In: R. Szewczyk et al (ed.) // Automation 2017 Innovations in Automation, Robotics and Measurement Techniques, series Advances in Intelligent Systems and Computing 550. Springer Int. Publishing AG 2017 p.166-168. DOI 10.1007/978-3-319-54042-9-15.
13. Kubisa S., Warsza Z. Dokładność identyfikacji parametrów modelu kondensatora 2 metodami MonteCarlo. PAR 2_2018 s. 41-48.
14. Puchalski J., Warsza Z.L.: The method of fitting a non-linear function to data of measured points and its uncertainty band. (in Polish: Estymacja niepewności wybranych funkcji nieliniowych wyznaczanych z pomiarów metodą regresji liniowej) // Pomiar Automatyka Robotyka PAR n. 3_2023 p. 45 -55, DOI:10.14313/PAR249/45.
15. Puchalski J.G. Nonlinear Curve Fitting to Measurement Points with WTLS Method Using Approximation of Linear Model // Int J Auto AI Mach Learn. Vol. 4 Issue 1, June 2024 pp.36-60. ISSN 2593-7568.
16. Warsza Z.L., Puchalski J. Assessment of the uncertainty of selected nonlinear functions determined from measurements by the linear regression method. Monography: Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XIII. Pavese F., Forbes A.B., A Bošnjaković et al (eds.): Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. v. 94 © 2025 World Scientific Publishing Co. N. Jersey · London · Singapore, pp.288-307, doi.org/ 10.1142/9789819800674_0027.
17. Warsza Z.L., Puchalski J., Więcek T.: Method of fitting a nonlinear function to measurement data and its uncertainty band // Proceedings of 15th scientific conference SP'2024 S: Measurement systems in research and industry. Łągow 9-12.06.2024 University of Zielona Gora 2024 (Uniwersytet Zielonogórski) pp.151-154. 978-83-957716-4-4
18. Warsza Z.L., Puchalski J., Więcek T.: Method with changing variables for fitting a nonlinear function to measurement data and its uncertainty band. // Measurement Sensors 38(2):101730. DOI:10.1016/j.measen.2024.101730
19. Warsza Z.L., Puchalski J., Więcek T.: Metoda ze zmianą zmiennych dla dopasowania funkcji nieliniowych do danych pomiarowych i ich niepewności (Konf. PPM 2024 Gliwice) Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 100 n. 12/2024 s.252 -259 doi:10.15199/48.2024.12.55
20. Warsza Z.L., Puchalski J., Więcek T.: Przykłady dopasowywania charakterystyk nieliniowych metodą zmiany zmiennych i ich niepewności. Metrologia red. M.R Rząsa (monografia konferencji: 56 MKM Kalisz). Politechnika Opolska, Opole 2024 s. 29-44. ISSN 1429-6063, ISBN 978-83-66903-71-5.
21. Warsza Z. L., Puchalski J., Więcek T.: Novel method of fitting a nonlinear function to measurement data based on linearization by change variables, examples and uncertainty // Open access Journal Metrology MDPI 2024, 4(4), 718-735; https://doi.org/10.3390/metrology4040042
22. Puchalski J., Warsza Z.L., Wyznaczanie parametrów schematów zastępczych rezystora i kondensatora z pomiarów częstotliwościowej charakterystyki ich impedancji // LVII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów Poznań 22-24. 09. 2025 Materiały konferencyjne. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2025 s. 325 -350

Supplement

Below are the analytically determined partial derivatives of the capacitor's equivalent impedance modulus for all parameters of the equivalent schematic elements. Impedances are represented as a series combination of resistances R_d and complex impedance $\frac{1}{A+jB}$:

$$Z = \frac{1}{A + jB} + R_d, \quad (\text{A.1})$$

where

$$A = \frac{1}{R_0} + \frac{R_1}{R_1^2 + \frac{1}{\omega^2 C_1^2}} = \frac{1}{R_0} + \frac{\omega^2 C_1^2 R_1}{\omega^2 C_1^2 R_1^2 + 1} \quad \text{and} \quad B = \omega \left(C_0 + \frac{C_1}{\omega^2 C_1^2 R_1^2 + 1} \right) \quad (\text{A.2}) \text{ and } (\text{A.3})$$

The partial derivative with respect to R_d for impedance square $Z^2 (Z = |Z|)$, i. e. $\frac{\partial Z^2}{\partial R_d} = 2Z \frac{\partial Z}{\partial R_d}$, where

$$\frac{\partial Z}{\partial R_d} = \frac{1}{2Z} \frac{\partial Z^2}{\partial R_d} = \frac{1}{Z} \left(\frac{A}{A^2 + B^2} + R_d \right) \quad (\text{A.4})$$

and similarly, derivatives with respect to R_0, C_0 i R_1 :

$$\frac{\partial Z}{\partial R_0} = \frac{1}{2Z} \frac{\partial Z^2}{\partial R_0} = \frac{1}{ZR_0^2} \frac{A + (A^2 - B^2)R_d}{(A^2 + B^2)^2}; \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_0} = \frac{1}{2Z} \frac{\partial Z^2}{\partial C_0} = -\frac{\omega AB}{Z(A^2 + B^2)^2} \left(\frac{1}{A} + 2R_d \right); \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial R_1} = \frac{1}{2Z} \frac{\partial Z^2}{\partial R_1} = \frac{\omega^2 C_1^2 (R_d((B^2 - A^2)(1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2) + 4AB\omega C_1 R_1) - A(1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2) + 2B\omega C_1 R_1)}{Z(A^2 + B^2)^2 (\omega^2 C_1^2 R_1^2 + 1)^2}. \quad (\text{A.7})$$

Derivation of the derivative with respect to C_1 :

$$\frac{\partial Z}{\partial C_1} = \frac{1}{2Z} \frac{\partial Z^2}{\partial C_1} = \frac{2\omega C_1 R_1 (R_d(B^2 - A^2) - A) - (2ABR_d + B)(1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2)}{Z(A^2 + B^2)^2 (\omega^2 C_1^2 R_1^2 + 1)^2}. \quad (\text{A.8})$$

Надійшла (Received) 11.10.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 11.11.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Варша Зігмунд – PHD, Польське метрологічне товариство, Варшава, Польща, e-mail: zlw1936@gmail.com ORCID:0000-0002-3537-6134

Warsza Zygmunt – PHD, Polish Metrological Society, Warsaw, Poland, e-mail: zlw1936@gmail.com ORCID:0000-0002-3537-6134

Пухальський Яцек – PHD, головний метролог Центральне управління мір GUM, Варшава, Польща, e-mail: j.puchalski@gum.gov.pl, ORCID: 0000-0002-5055-8550

Puchalski Jacek – PHD, chief metrologist of Central Office of Measures GUM, Warszawa, Poland, e-mail: j.puchalski@gum.gov.pl, ORCID: 0000-0002-5055-8550

Визначення параметрів еквівалентних схем резисторів та конденсаторів за вимірюванням частотних характеристик їх імпедансу

Зігмунт Л. Варша, Яцек Пухальський

Анотація

У статті представлено метод визначення параметрів еквівалентних схем резисторів та конденсаторів шляхом з'єднання двовивідних елементів з одиничним лінійним опором, індуктивністю або ємністю. Значення та невизначеності цих параметрів оцінюються за допомогою методу найменших квадратів для вимірювань частотної характеристики модуля імпедансу. Це завдання є математично складним, оскільки зазвичай отримується система нелінійних рівнянь, яка аналітично не розв'язується. Для отримання лінійних рівнянь було запропоновано використовувати метод заміни змінних. Цей метод був раніше розроблений авторами для регресії нелінійних функцій і вже успішно використовується в метрологічних задачах.

Ключові слова: схеми заміщення, опір, ємності, індуктивність, частотна характеристика, модуль імпедансу.

MAPS CAN SUPPORT QUANTITATIVE EVALUATION OF EARTH'S SURFACE FEATURES WITH THEIR EVOLUTION IN TIME BETTER THAN GLOBAL NUMERICAL PARAMETERS

F. Pavese¹

¹*Independent Scientist (former Research Director at CNR), Torino, Italy*

Abstract

Global numerical parameters are recently preferred in scientific fields to evaluate Earth's surface features, namely in climate evolution. However, they may not fully represent the complexity of the issue they intend to qualify. The paper illustrates the fact that the intended aim can be better reached by adding the assistance provided by the evaluation of maps, especially in the case of Earth's parameters, a method already common in Spatial Big Data evaluation. Additionally, the fact that the map graphical representation is intrinsically mediating a parameter that is always associated with each data of experimental origin, datum uncertainty, so representing a kind of alternative way to model a database. Especially when maps illustrate a great variety of local situations, the visual (i.e., geometrical) examination offered by maps often allows superior information, so a more reliable and full evaluation of evolution typically in time. Cases are reported to exemplify these statements.

Keywords: global numerical parameter; data uncertainty; Earth maps; parameter spatial distribution; qualitative evaluation; quantitative evaluation.

1. Introduction

In recent years, the almost exclusive use of global numerical parameters is preferred to characterise trend changes in time in scientific fields like meteorology and climate science (see [1] as a reference of basic importance). The preference arises from the new possibilities allowed by the systematic use of informatics means to extract the relevant information from wider and wider databases having induced the new term 'Big Data'.¹

On the contrary, the present trend of informing about global changes and related parameters is the one preferred by all the International Organisations involves in climate change, namely. [1] It consists in summarizing the changes via *global numerical* parameters, typically assumed to represent the evolution of the *mean* numerical value of big datasets correctly. However, in their synthesis, global numerical parameters may miss scientist's understanding of the existing complexity of the full set of values obtained from the measured data that they intend to qualify.

On the other hand, the traditional field of using maps for extended sets of data, namely the *spatial* one, was not surpassed in its unique capability to clearly convey, with its (visual) representation, details on the significance of the studied phenomena and of their variations in time, especially when the aim is to forecast future trends. In some fields, like that of analyses of the Earth's surface, maps have long since been used (e.g., [3–4]) and recently the Food and Agriculture Organization of the United Nations has also confirmed its preference for their use. [5] Accordingly, a revamp of the generalised advantages of visualisation in science occurred, as found in the literature, especially in

philosophy of science. [6–8] On the other hand, within the recent developments of informatics one might also observe a possible increase of visualised–data misunderstanding [9–11].

Especially when the maps illustrate a great variety of situations, a comprehensive geometrical examination is recognised to report superior information – also *quantitative* since maps are graduated. This allows an overall and more reliable evaluation and its evolution, typically in time, a possibility that does not introduce any kind of conflict between mathematical and geometrical human examination but simply useful complementarities, already appreciated in the literature [12–13].

The paper will not follow the standard sequence of sections, due to the complexity of the matter.

In Section 2 it first provides a comprehensive introduction to the state-of-the art of data collation in databases and manipulation. Then, in Section 3 illustrates data visualisation by means of maps, but not from a cartographic–science viewpoint, instead from the viewpoint of *measurement–science*, according to the Journal readers main interest: this is a multidisciplinary frame allowing deep analyses of data of various origins according to the discipline of *metrology*, author's main competence. How the original numerical data can be used to plot a map is a cartography–science task. Providing evidence of the main new features introduced by Earth's mapping of climate parameters, and of the ways to take advantage of the different types of representation in the maps, will be the only author's aim.

However, the term 'visualisation' indicates a great variety of types of data graphical representation, from simple graphs, to 3D complex mapping, to its use in simulation. Therefore, the paper will restrict the subject matter *exclusively* to the examination of the mapping of Earth's surface – full or partial but never local, and *never* enter into the task of map realisation from the original dataset.

It only intends to bring evidence of map superior content of information: in addition to simple visualisation,

¹ As a consequence, also a brand-new discipline stepped in, called 'dataism', [2] even assumed in its extreme form to replace the traditional scientific procedures of metrology to analyse the quality of datasets.

this paper shows how maps allow to also retrieve underlying numerical data by means of a computer – based method recently introduced by the author [15]. It allows the interested scientist to extend her analysis beyond the global parameters without the need to retrieve the original dataset, so paralleling the qualitative analysis obtained by visualisation with the addition of quantitative analyses.

Some problems, related to the presently dominant way to get the desired local and overall information in climate science, are also shortly discussed according to the relevant literature but without the intention of making a review paper of those subject matters. The Global Mean Surface Temperature (GMST, look e.g. at the term ‘GST’ for its meaning in [16]) will be used as the single example because of its special importance and normally consideration by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [1] and others Committees, as one of the most popular parameter.

The basic features of a quantitative analysis of GMST with the method reported in this paper are fully reported in [17], so they will not be repeated here in full, but in Section 3 a *flowchart* summarises the procedure. For other popular global parameters: the show/ice surface annual coverage was already analysed by the author in [15]; the mean ocean level variation with time, is not suitable for map analysis.

Finally, *qualitative* examples of visualisation are reported in Section 4.1, while detailed *quantitative* examples and the related procedure are shortly introduced in Section 4.2, then, due to their extension, fully discussed in Appendix A.

2. State of the art of collation and manipulation of databases in climate science

As introduced, e.g. in [16], any estimate of the *spatial distribution* of climate data is affected by the *uncertainty*. The level of data *uncertainty* is, and remains, the basic ‘quality factor’ that scientifically must *always* be associated to every piece of knowledge. It can critically affect the overall evaluation concerning their meaning and use, even making it sometimes inconsistent or deficient depending also on the type of chosen data representation.

The evaluation of the effects of data uncertainty can be insufficient, or even deceiving, when limited to concern global numerical parameters, namely when they are intended to cover the whole Earth's surface: specifically, “a [data] fit does not obtain the *combined* [i.e., total] *uncertainty* of any summary parameter, but only *part of the random uncertainty components*” [17].

The World Meteorological Organisation (WMO) [18] is the International Body deputed to measure hundredths of meteorological parameters, so also forming the most reputed databases of all World Organisations dedicated to climate science studies, since WMO also supplies the *accuracy* of each datum (see later Foot Note 4). For evaluating the Global Mean Surface Temperature (GMST), up to millions of WMO weather Stations, of

different models using different methods, all using contact thermometers, are sparse on most of the ground surface (see Fig. 1 for the set of Stations in part of Europe); for the liquid surfaces, namely for the oceans, most results are today obtained instead from satellite observations, using total radiation thermometers. Nevertheless, the mean distance between stations *on ground* may still be too large, as shown in Fig. 1, for creating a sufficiently dense overall network of numerical information forming the climate Big Data repository:² a subsequent measured data *interpolation* is required via mathematical/geometrical means. Therefore, a set of *computed additional* values is added to the set of original *experimental* values to form the analysed overall data network. To each of these points, both original and computed, an *uncertainty* is necessarily associated—the computed ones must be integrated by components arising from the estimated interpolation uncertainty. In addition, the original *experimental* data are then subjected to several critical procedures for completeness of the distribution, such as ‘cleaning’, etc., called homogenisation, *each step contributing to the total uncertainty*.

The public databases are the final version after the above procedure. Overall, they are very large and normally *not reporting the associated uncertainty*. The set is then numerically treated to get, e.g., the *mean value*: for temperature the GMST is such value for temperature (see [19] for a discussion in the case of its extrapolation in time).

Instead, a complete scientific treatment should consist in determining first also the factors influencing the obtained numerical information and their effect, namely the *systematic* ones affecting the best stability of the chosen measurement *procedure*, when building the so-called *Uncertainty Budget* (UB), a basic mandatory tool of measurement science for the estimation of data *accuracy*.³

However, an analysis deeper than ‘reproducibility’, i.e. *precision*, is often *not possible*, namely for maps, since the evidence of the systematic components arises from the *process* of planning the measurements, *not* from the results of the measurements, the data. That is a general difficulty, if not often impossibility when the original provider of the results does not provide her own analysis including also systematic effects evaluation and then this analysis becomes available to the cartographic scientist – even though it might have a limited effect on the map construction.

In addition, in documents like IPCC Guide [20], the approach is rather more similar to the kind of uncertainty/quality evaluation typical of the economic frames, e.g. by using risk factor and similar parameters,

² For example, weather prediction models for 100 km operational forecasts are said to need be based on a 9 km grid spacing.

³ The treatment, performed according to the full methodology of measurement science, whose most critical goal is to assign *accuracy* to the dataset, is intended to provide the *complete* detailed description of the procedure used for its estimation—including the *systematic effects*. [22]

and by using words instead of quantitative parameters—such limitations have already been noticed and commented, e.g. in [21].

Basically, a simple non-weighted *fit* of the *manipulated* database is generally performed for representing data accuracy – and incorrectly considered as such instead of only precision. This fact has been verified *by the author*, by making its own fit of some large databases publicly available from World Organisations, and then comparing his results with the corresponding published results. His obtained standard deviation (s.d., *s*) of the fits, i.e. the evaluation of data *precision*, constantly was of the same order of magnitude, or even higher, than *published* ‘uncertainty’ – in one case, even indicated with a $2s$ confidence limit—reported as the accuracy of the results.

From that type of analysis, in fact, only a component of uncertainty is provided: an evaluation of the *consistency/quality of the fitting trend* basically guiding toward the ‘best fit’ – defined as the one providing the minimum s.d. It is obtained by only *tracking the values* of the data, *not also* their associated uncertainties (possibly except when providing the weighted mean). There are also other statistical tools for a more substantial evaluation, but they are out the scope of this paper. In all instances, the *systematic components of uncertainty basically remain unexplored*: precision and accuracy are made to coincide.⁴

3. Plotting data onto a map: from a numerical to a geometrical representation of the same data

Like in previous author’s publications on similar matters, author’s intention is not to go into details of cartography science, which is not among his scientific competences, but to illustrate the metrological advantages of using published maps that are implicit in their kind of visualisation: “In such a representation, the measured values of the parameter(s) of interest are superposed on the geographical basic information (the map). The most efficient way, given the subsequent analysis, is generally not to use a continuous shift of the map colours to represent values, but to have the colours *discretised* in (small) spatial steps” [17]. The result is that a colour/gray map is formed of regions of different uniform tones.⁵

Tones form a scale of those parameters consisting of discrete contiguous steps representing a (small) range: e.g., for the GMST a step range of 0.5 °C for the

full range from $\Delta t = -0.5$ °C to $\Delta t = +0.5$ °C (i.e., 20 steps/colours) is commonly used.⁶

Note also that, for the *geometrical* representation, the *same set* of numerical data of the database used to compute the global parameter is obviously used, by effectively *superposing* these values of the parameter(s) in question onto their geographical coordinates of Earth’s surface representation.⁷

In summary, after having reported all values within the range of a single step, the Earth’s coordinates of all data determine the boundary of each colour/gray region on the map, not necessarily unique or made of continuous portions. However, the extension of each specific colour/gray area is bounded by the most marginal coordinates of the measured data and must ensure that no gaps remain between continuous regions about different steps—i.e. that the set of these regions covers the *full* map surface.

In such conditions, the uncertainty affecting values located marginally of a given colour area of the map could determine an uncertainty in the correct position of the boundary of each coloured region. In the vast majority of cases, such indeterminacy corresponds to irrelevant changes in the total extension of the surface attributed to two adjacent steps. In all instances, this fact can be considered less critical than the effect of the uncertainty affecting numerical computations based on the numerical database. A possible more critical issue may arise when the chosen step/range size is *too narrow* with respect to the level of uncertainty assigned to most data, since it might increase too much the boundary in the determination or the correct positioning on the map—however most often not so critical in meteorology. This might occur, e.g., in the above example, should GMST steps of 0.25 °C be used instead of 0.5 °C.³ Concluding, *a map normally takes implicitly and indirectly into account also the uncertainty associated with each value measured inside that single area.*

In other words, a map is a consistent visual representation of the overall variability of the parameter value across the map dataset (but see later FootNote 9 about the need to use the correct *type of map*), not significantly affected by the uncertainty, i.e. about the *exact* position on the map, of each *single* dot—information.⁷

Thus, a picture of the distribution in space of the dataset is obtained via the visualisation of the *measured* values at the correct Earth’s coordinates, independently from its *density*. This feature might be considered a form of *averaging* over passing the uncertainty of the numerical values, sufficient in meteorology for the semi—quantitative analyses generally made. In fact, as it

⁴ Until recently, WMO assigned to each worldwide meteorological Station an *accuracy* of ± 1 °C [23-27]. Then, since a few years, WMO decided to classify the Stations under 4 classes: #1-2 accuracy ± 0.2 °C [28]; #3 accuracy ± 0.6 °C; #4 accuracy ± 1 °C. [29] Classes 1-2 are still a minority of the certifications so far provided

⁵ Actually most often, in the paper-printed/file representation, a colour step is actually consisting of a *narrow range* of contiguous colours: see later about its handling.

⁶ Note that the GMST is expressed as the temperature change Δt of the specific year from the temperature of a (previous) *reference* year: $\Delta t = T_{\text{actual}} - T_{\text{ref-yr}}$, for each determination.

⁷ Basically a World map is merely a 2-dimensional representation of Earth features with respect to their geographical coordinates.

clearly comes, e.g., from Fig. 2, when *iso-regions* of the measured values for the chosen parameters are added to the map, e.g. uniform regions in 0.5 °C steps, the criticality of the uncertainty associated with the value measured by each Station is largely over passed, also considering that those regions are certainly also smoothed in mapping.⁸

In this way, a geometrical visualisation is generally quite more informative than a table of numbers or its mere interpolation, and the needed approximation produced by such a *discretisation* is generally sufficiently accurate to compensate for the lack of a numerical indication on a map of the uncertainty of the original data.

One might either argue that a map cannot compete in *resolution* with a dataset, with possibly the exception of very extended maps. That is anyway only partially true: low resolution could generally be enough for the purpose of a printed map—but, in principle, a map distance resolution can be, if needed, as precise as 30–100 m when embedding data from satellite observations. On the other hand, when, for example, the interest is to track overall *surface temperature* variations to compute the GMST, one is certainly not interested in identifying small details on the map.

Finally, there exists an *additional bonus, not to be confused with the above properties*, and normally not considered in the literature, represented by the *reverse possibility* of retrieving, with sufficient precision by using due techniques, the underlying numerical values from any published map. Instead, this may become as a double-check of *the consistency level of the original numerical values*—as found in [15, 30], and as later illustrated in Sections 4.2 and in the Appendix A. See in [15] how a *UB can be estimated* when using maps. Also see in the above references a discussion about *the evaluation of the precision* of the reversely computed numerical data.

4. Using maps for a deeper evaluation of phenomena in climate science, through examples

The reported examples, all concerning the surface temperature distribution bringing to the GMST, are exclusively intended to discuss how a map conveys more information than the simple analytical treatment of the numerical database. For this purpose, a larger set of these maps is reported in Fig. 3: all taken from the literature concern the variation in time of the SAMT,

⁸ In addition, one should also realise that the provided WMO uncertainty value concerns the *punctual* local temperature value assigned (i.e. also corrected for systematic errors) to the thermometer *inside* the Station, so conventionally representing the mean temperature of the volume of air within the Station at a 2 m elevation from ground. It is then assumed to be valid for an *indefinitely* large volume of atmospheric air in the surroundings—a reason limiting accuracy.

and show a variety of results. Concerning instead the parameter ‘seasonal ice coverage’, e.g. see Ref. 15.

All these maps are full-World and of Robinson-like types (see later when that type of map must be used and when not), where the colours indicate the distribution of different levels of *temperature variation values with respect to a previous reference year*—not in all the same reference is used, nor all refer to the same end year of the period shown: this may contribute to the observed *variety of parameter-value distributions* shown in different maps, but it could instead more likely arise from differences existing in the collected datasets.

In cases like that of temperature distribution, the *correct map* type must be used,⁹ the one with *iso-surfaces*, i.e. the Peters’ or the recent Equal Earth one, [31–32] rarely used in the scientific literature where the Mercator or Robinson ones are used instead, of the distance – proportional type.

4.1 Qualitative map analyses: an example

In first instance, maps can be metrologically analysed to simply detect *qualitative* features—something only revealed by the use of maps—such as *an insufficiently univocal* estimate of the temperature-change *patterns* related to their changes in time in different maps or different surface portions.

In the case of the GMST parameter, the first basic feature is its difference between land and water surfaces, obviously implicitly embedded in the database and in the GMST computation, amounting to $\Delta t \approx 0.5$ °C of lower increase in time for oceans, according to published estimates (e.g. Ref. 20).

That feature, alone, makes a big difference between partial ‘G(M)ST’s (GST will be used in the following for such ‘local’ meanings) of what are called the two ‘land and water hemispheres’ [27], i.e. the occurring extreme grouping of lands such that the ‘water hemisphere’ surface is instead made of water for its 89%—while the ‘land hemisphere’ is made of water for only the 53% (a similar difference exists also for the North and South hemispheres, somewhat, but not basically, different). See later the Appendix (d) for a quantitative evaluation from a map.

As to the *land* – the portions of Earth’s surface where all humans live—the distribution of the (local) GST values is extremely varied. In Figs. 2a and 3a the only regions consistently hotter are in Europe, with an extension to Siberia on the East if the considered period

⁹ Most of the literature maps use the Mercator/Robinson-type of Earth’s representation, as it can be appreciated from the large size of the Polar regions: that means that the maps are *not* representing proportionally the different portions of the Earth surface—differences are listed in Table 1 of [30]. That is a strong limitation in correctly comparing in the real proportions the surface (cont) showing different temperature variations. Note: the NOAA maps used here in Appendix A as the examples of computation show in gray tone the two Polar regions, so excluding them from the assignment of temperature-change colour tones.

of time is anticipated of 10 years with respect to Fig. 2b. Total hotter surface is found to effectively increase only when starting the comparison much earlier, to 1951 as done in Fig. 3b(ii). However, when comparing identical periods (2020 situation with respect to 1981–2000) the differences in Fig. 2a and Fig. 3b(iii) are still remarkable.

On the *oceans*, the blue regions indicating a lowered GST are also remarkable and quite varying in time. On land such a lowering on land is much less extended and frequent, especially in the northern hemisphere.

Apparently, most of the GMST increase happened before 1980, as shown in Fig. 3b, apart from the Arctic region—while the Antarctic hot region disappeared—but the extension of such areas is altered when choosing different map types, as commented in Foot Note 9. Siberia looks like the land region with the most variability in time.

It is *not* the aim of this paper to discuss the reasons for the evident differences between maps shown in similar periods, but only basically to provide evidence, from them, of the fact that the evaluation of the *distribution of surface temperature* can basically be *insufficiently consistent* when expressed by the value of a single global numerical parameter.¹⁰

On the other hand, the importance of the data *uncertainty* of each single measured point constituting the database is *strongly limited* in the maps and can even normally be disregarded—a useful issue when the uncertainty evaluation might be controversial.

4.2 Examples of computations based on maps: quantitative retrieval of the original numerical information for specific evaluation of parts of the maps

Additionally, the *numerical information* (not the original data from a database used to build the map) underlying a map can *be retrieved back quantitatively* from each map [15], obviously affected by an *uncertainty corresponding* (at least) to the width of the colour step due to the *discretisation* of their geographical coordinates.

This possibility may be important and useful for *any scientist interested to retrieve of her own* (numerical) information from the surface portions reported with the *same* colour and able to compare her own findings with the ones in the literature. That possibility necessarily requires, as in the case illustrated in [17], the use of an iso-surface projection, the Peters'—resulting more correct than Robinson's ones (see Footnote 9): based on it, e.g., the *uncertainty* of the GSMT retrieval estimated within $\approx \pm 5\%$ was obtained

in [30]. From different map *types*, instead, differences in the GMST value of up to $\approx 20\%$ were found to occur.¹¹

The remaining contents of this Section are moved to Appendix A in order to make evident the fact that a specific technicality is needed not strictly related to the normal visual analyses of maps. The author found it useful in several circumstances, requiring a procedure that can be found in details in his previous publications on this subject matter [15, 17, 19, 30], here summarised in the flowchart of Table 1a below and with results reproduced for this paper in Table 2 (see Appendix A).

5. CONCLUSIONS

The retrieval of the numerical value of some global numerical parameters could now be obtained by starting from a type of visualisation consisting of maps of the distribution of the relevant parameter(s) over the full/partial spatial extension of an Earth map. The possibility of this retrieval is a new opportunity for the scientists interested to understand or double-check the quality of the published analysis results. The uncertainty of such evaluation may even be comparable to the one attributed to the parameters by means of a direct numerical analysis of the databases. This use would limit the risk of a poor estimation of the uncertainty of the databases, with the consequence of standing controversy.

Actually, maps additionally allow a more *extensive* and *complete* analysis of the collected information, qualitative and quantitative, thanks to the visualisation of the *distribution* of the information over their whole extension: e.g., that advantage especially concerns the evidence of the *extent of non-uniformity on the surface of the values of interest*, so making possible the evaluation of the geographical/'political' reasons for that [30]. Such richness of information is lost when summarised in a single numerical parameter. Maps are less 'apodictic' than global parameters and allow scientists to form their own diversity of thoughts, which is the basis of science [31].

Similar exercises as the one illustrated above, made on other maps, would also show a variety of situations that otherwise may remain implicit or undetected in a numerical treatment: in the case of meteorology and climate science, they should be explored in the context of their spatial distributions.

Concerning the extent of information on the Earth's surface, a geometrical representation looks superseding the pure mathematical one, and revealing a possible risk for the *scientific meaning* of a global purely *numerical parameter*, so becoming *significantly weak or even rather irrelevant*. That is particularly important when it is necessary to avoid such a situation in the case the analyses are directed to make forecasts. [19].

¹¹ In that respect, however, an *uncertainty* of 20% of the current GMST value taken as the reference in recent literature, $\Delta t = 1.2$ °C, would mean an interval of possible values from $\Delta t = (+0.9$ to $+1.3)$ °C: this is still within the actual uncertainty of the GMST value according to the correct metrological analysis based on the WMO indications. [18, 28]

¹⁰ As another example of the need of referring a situation occurring in specified places of a map, the authors in [21] had to indicate a feature of the Northern hemisphere only. See similar situations also in APPENDIX (d).

APPENDIX A

Examples of computation procedures concerning retrieval of *quantitative* numerical information in maps

The procedure for the computations is summarised in Table 1 of Section 4.2, where the full procedure *flowchart* is reported, related to Figs. 2–4 (for full instructions see [15]).

Table 1 – Tabular flowchart showing the procedure to obtain the retrieval of the numerical information (*not* the original data) underlying a map.

1.1		Copy on an Excel (or equivalent) a full Earth map of Peters proportional–surface type [31] The map should have a dimension of 300'000 pixels or more. The background <i>must</i> be white or colourless, apart the colour–scale strip (see 1.2). Record the total pixel number of the map (i.e. no borders or other outside the Earth surface)
1.2		Ensure that the map also show (below it, NOT on it) a strip of boxes with the colour coding for the full parameter range (e.g., 20 boxes each for 0.5 °C from negative to positive values). NOTE: The box should <i>not</i> be taken from any other file
1.3		Make a check of the colour–tone homogeneity on the recorded file, as follows:
	1.31	Set the colour selection tool for “non contiguous” and “tolerance” = 0
	1.32	Click on one of the colour boxes (i.e., <i>not</i> on the map)
	1.33	Adjust the <i>tolerance</i> , by increasing it by steps, until the selected tone box looks (almost) completely selected
	1.34	Increase a bit the tolerance until some pixels in a <i>contiguous</i> box becomes also selected
	1.35	You will possibly find a (small) range of tolerances in the two cases: if not, use it; if yes, select the mean tolerance for the subsequent steps
	1.36	All box counts should provide the same pixel count, within a few. That is a component of the total uncertainty of the procedure. Record the pixel count of each and the tolerance
	1.37	For the computation of the 50% of the pixel distribution use the values in 1.36 as explained in the text concerning Table 3. VERIFICARE
	1.38	If you are making the comparison of two maps, make the same of above for the second. The map must be uploaded with an identical dimension in pixels, adjusting it size as necessary, within 1–2%. For its colour scale proceed as in 1.2 and 1.31–1.36
1.4		Now start with the first map and use the colour tolerance selected in 1.36
	1.41	Select both the map <i>and</i> its colour strip, and click on a central–value colour on the trip
	1.42	Different areas on the map will also be selected in addition to the full colour box
	1.43	Open the window showing the pixel count for the selection: record the pixel count and subtract the count saved in 1.36. That is the value in pixel of the area on the map
	1.44	Do it for all the boxes of the colours trip
	1.45	Sum up all the registered values: the sum should correspond to the total map surface value in pixel ... but rarely exactly
	1.46	You may <i>repeat</i> the steps of tolerance adjustment above and modify a bit it until get the exact total value. However this is OK only for very small adjustments (change of $\pm 1-3$)
	1.47	Double check that no pixels are selected outside the map surface: you can check it by selecting all colours and check the difference with respect to the value in step 1.1 (and double check its correctness), with a circular adjustment procedure of all previous steps. A precision between 2% and 5% is in general satisfactory
1.5		For the adjustment you consider satisfactory, record all the pixel counts for all the colours, and estimate precision
	1.51	Reduce to 0 (zero) all final counts lower than precision, as they are not significant
1.6		Start with the next map
Partial surface		If you are interested on only a partial surface, upload only that portion of the map, then act as above on it
Ground/ water (sea)		In general, you should find ground and sea naturally separated by their parameter (colour) differences. Otherwise, you may try to make ticker or with a new colour the boundaries of all ground portions, in order to be able to select only ground or only water.
Polar regions		To exclude polar regions, if not already greyed as they are in certain maps, you can select their boundaries and change their colour to gray
Comparing maps		You may (visually) compare a map with another map (e.g. of population density), by keeping the superposed upper one of exactly the same dimensions and by making it sufficiently transparent. This may make easier to retrieve also the data from the latter.

For the retrieval, the graphical programme Photoshop has been used by the author, but others can provide an equivalent suitable tool.¹²

Since, in this case, two maps have to be compared, they are first copied on separate files with the *same dimensions* (i.e. number of pixels) to avoid unnecessary conversion factors. Each map is provided with a colour scale. As already alerted in [15], one should not assume that in a scale in 20 steps, from deep blue to yellow and deep red colours, each step is made of a *single pure tone* of the colour scale of 256 total tones: that is the typical change caused on the original map by its downloading from a public version—typically from a file reported in a publication—onto the computer for the analysis. Therefore, a first necessary alert is that the user must be aware of the fact that any coloured area representing ‘one tone’ (in the case of the example a temperature range of 0.5 °C) contains pixels over a *small range of tones*: a ‘tolerance’ must then be provided to the tool selecting the desired tone range. In the present example, a tolerance of 35 colour tones was found necessary and sufficient—otherwise not the whole sample area is selected or, in the reverse case, more than one sample areas are selected. In this case, the selected sample in the reported scale corresponded to ≈ 600 pixels for *each* sample tone in the 20–tone scale reported below the map, providing an *additional* total of 12000 pixels in the *count of the map size*, which has to be eliminated from that count; ≈ 600 pixels must be eliminated when making the count of each colour selection in the map (the tone–scale must remain *visible* and selectable, to visually ensure that the selection of the desired tone on the map is correct).

On the other hand, the file must contain only the map and the colour scale on a uniform background, typically white (or colour absent). The size of the map must ensure a sufficiently high number of pixels for the maps to be examined to allow sufficient precision of the recovery.

Some specific issues are now illustrated.

(a) Total size of the map. The first step consists of obtaining the total number of pixels of the entire map, i.e. of the map by excluding the uniform background: in the present case (Fig. 2) it was $\approx 350^{\circ}000$. In order to compare several maps, it is better to scale up them to about the same dimension: in the following, the two maps (a) and (b) differed in the surface by 2%, almost irrelevant—but the final values of the parameters were anyway corrected for that small difference in total surface.

One can notice that in the maps in Fig. 2 the two polar regions are greyed (the gray being distinct from the tone scale: probably no data in those regions). That is good because the map is of the Robinson type, i.e. a non–iso–surface type. When a Peters’ projection is not available, like in this case, in first approximation one

must *halve the surfaces (number of pixels)* in the regions above 60° of latitude of both hemispheres [15] if they have to be taken into account, to make a sufficient correction.

In the present case, these gray areas were left out of the computations, thanks to their specific colour, except for some final elaborations and considerations (see later). They represent a different amount of surface in the map: the North Pole region is 6% of the North hemisphere, while the Antarctic Pole region is 21% of the South hemisphere (for map (a), 6% and 19% for map (b)). They represent in total 14% of map (a) (actually the 7% after correction), or 12% of map (a) (actually the 6%): this issue is commented on later and represents already a relevant difference in the determination of the GMST.

Thus the colour analysis has been performed on about 95% of the surface (for a more exact difference in the surface distribution from the two types of maps, see [23]), the one where most humans are living.

(b) Colour distribution analysis. Now one can analyse the coloured portions of the maps, and get a distribution of the surfaces (measured with the unit pixel, provided by Photoshop under the ‘Histogram’ tool).

To select a colour for the totally selected map, one has to click on the sample in the colour–scale, corresponding to the indicated temperature range: all the corresponding pixels (within the chosen tolerance, here of 35 pixels) will be selected and the total reported. Table 2 reports these values for both maps. Then one has to subtract 200 pixels from the reported value, for each interval selected of 0.5 °C¹³ (for specific reasons one could also select more than one sample/interval¹⁴), getting the correct proportion. Selected values less than 600 pixels should then be zeroed for that interval (e.g., as it happens for extreme values of $\Delta t \geq \pm 3$ °C).

In Table 1 also the fractions in percent of the total surface are reported.

The so–obtained sum of the surfaces can be somewhat different from 100% because the pixel selection feature is not 100% exact, but the difference between 2% and 5% can be considered acceptable. Otherwise one can try adjusting the tolerance value (as done, e.g., in [23]), for the best approximation.

(c) An example of computation of the retrieved data. The GMST is defined as the mean surface temperature variation for the whole surface. Therefore, it corresponds to 50% of the pixel selection. It can be obtained in different ways: by computation from Table 1 or directly from each map (so also getting an indication of the precision of the obtained values).

¹² It is easy to anticipate that professional AI may play a useful future role in patterns recognition on maps.

¹³ Colour intervals equivalent to a temperature range of 0.5 °C are sufficient for the analysis, though sometimes maps report colour intervals of 0.25 °C.

¹⁴ A two contiguous steps analysis is useful if data uncertainty is higher than the size of colour steps, in order to check for possible differences in the surface-attribution evaluation.

In the present case, one additional issue of interest is to understand if the two maps bring *significantly different situations*, as they report it for periods of time subsequent by 10 years.

From pixel counts in Fig. 2 one gets GMST values indicating even a lowering for the period (1991–2020) with respect to the period (1981–2010), from $\Delta t = +0.50\text{ }^\circ\text{C}$ to $\Delta t = +0.34\text{ }^\circ\text{C}$.

The fact that this evaluation does not include the two Polar regions cannot be considered to significantly affect the computations, for two reasons: first their real surface is much smaller (6–7 %) than it looks in the Robinson type of maps, and these regions are inhabited, a feature that can basically induce an effect only on the mean ocean level—namely on the South only, since on the North the marine–sea ice melt does not produce any effect on the sea level, and Greenland is responsible for only a minimal contribution to the total Earth ice amount.

The GMST can also be computed differently: by plotting the data in the ‘Proportions’ columns, as reported in Fig. 4a,b. From them, GMST values are $\Delta t = +0.56\text{ }^\circ\text{C}$ and $\Delta t = +0.38\text{ }^\circ\text{C}$ are obtained, basically confirming the previous values. The pixel count varies in dependence of the tolerance assigned to the search of its best value, i.e., in the Figure the chosen “best tolerance” is used.

In order to find it (according to steps 1.33–1.36 in Table 1) you should use the following procedure:

(i) Start from a low tolerance, e.g., 8 pixels, and make a table of the pixels counted for each and all the colour steps used in the map on analysis, and compute their total;

(ii) Repeat the operation for increasing tolerance values in steps, e.g., of 8 pixels: you will get different values and different totals. Initially the total number increases, but, above a certain tolerance value you will find, a decrease—then again a rapid increase;

(iii) That point in general corresponds to near the 50% of the total pixels of the map;

(iv) If you are within a few percent close to 50% you can stop and record the tolerance.

In Fig. 5 the result is reported for such a search for Fig. 3a: the optimal tolerance was 16 pixels for the second trial, being 14 and 32 the adjacent trials. The corresponding selected pixels were 54’707, 92’640 and 79’285, corresponding to 0.47, 0.69, 0.48 for a *map of the Robinson type*. However, as already pointed out, the correct map type is the *Peters* one, having a different pixel distribution per latitude (as indicated in Table 2 [17]) therefore the number of counted pixels for latitudes $>60^\circ$ can simply be divided by 2, as already suggested. The corresponding counts for a Peters map become 0.42, **0.55**, 0.39, thus tolerance 16 is sufficiently close to the goal.

(d) More information from maps: polar North–South hemispheres difference.¹⁵ The greyed surface regions in the two hemispheres are quite different in

size: while the North one is basically limited to the North Polar Sea and neigh borough lands (a total of 12300/12800 pixels *for the two maps*, of which sea is the 91%/92%), the South Polar region exceeds 42000/37000 pixels, not only because the Antarctic land covers 16000 pixels, but also because the South Polar sea surface is considered extending for 25000/21000 pixels, about the 60%/56% of the total. The overall effect is that the map representation is not equivalent for the two hemispheres, with the whole North colour map exceeding the South part by about 11° – 14° in terms of latitude in the two maps.

On the other hand, one can certainly appreciate the fact that the land distribution in the two hemispheres is *substantially different*, with most of the human activities (if assumed to influence the climate) being concentrated in the northern hemisphere.

It is also possible to make a *comparison of the two hemispheres* about the proportion of the temperature changes, $\Delta t = (-5 - 0)\text{ }^\circ\text{C}$ and $\Delta t = (0 - +5)\text{ }^\circ\text{C}$. The difference is *substantial*: the North hemisphere is 40% higher in temperature increases and very poor in decreases, while the South hemisphere is 5 *times* richer in temperature *decreases*, basically concentrated on the oceans, which are predominant in the Southern hemisphere (where the IPCC estimate of the GMST increase for ocean water is of only $\Delta t \approx +0.5\text{ }^\circ\text{C}$).

Table 2 – Comparison of the position of the latitudes on a linear scale and on Peters’ scale^a [17]

Latitude (degree)	Peters Map	Width change	Latitude displacement (degree)
0 (equator)	–	–	–
5	8.4%	–	+3.4
10	17.7%	9.3%	+7.7
15	26.6%	8.9%	+11.6
20	34.9%	8.4%	+14.9
25	42.8%	7.9%	+17.8
30	50.1%	7.4%	+20.1
35	57.0%	6.8%	+22.0
40	63.3%	6.4%	+23.3
45	69.2%	5.9%	+24.2
50	74.5%	5.4%	+24.5
55	79.4%	4.9%	+24.4
60	83.7%	4.3%	+23.7
65	87.6%	3.9%	+22.6
70	90.9%	3.4%	+20.9
75	93.8%	2.9%	+18.8
80	96.1%	2.4%	+16.1
85	98.0%	1.9%	+13.0
90 (pole)	–	1.4%	–

^a Peters projection is basically the projection of a circle arc onto the radius.

¹⁵ See also the already cited [15].

Table 3. Quantitative analysis by pixel count for the maps in Fig. 2.

(a) 2022 (ref. 1981–2010).

Δt (°C)	N° pixels total	Proportions Net (pixels)	Proportions %	Progressive coverage		Comments
-5.0 – -3.0	2300	0				≤ 600 px/tonne
-3.0 – -2.5	604	0				
-2.5 – -2.0	585	0				
-2.0 – -1.5	593	0				
-1.5 – -1.0	589	0				
-1.0 – -0.5	6384	47600	12.4%	12.4%		
-0.5 – 0	42426					
					0.50°C (50%)	Mean (GMST2022)
0 – 0.5	97000	96400	25.1%	37.6%		> 0 °C
<i>0 – 1.0</i>	<i>(202000)</i>		<i>(52.4%)</i>			
0.5 – 1.0	141000	140400	36.6%	74.2%		
1.0 – 1.5	27300	26700	43.6%	82.3%		
<i>0.5 – 2.0</i>	<i>(181000)</i>		<i>(46.9%)</i>			
1.5 – 2.0	8400	7800	2.0%	84.3%		
2.0 – 2.5	4400	6300				
2.5 – 3.0	3100	2500				
3.0 – 5.0	6200	3800	1.0%	85.3%		
Totals	340880	331500	84%	85.3%		<i>Without Poles</i>

(b) 2022 (ref. 1991–2020)

Δt (°C)	N° pixels total	Proportions (pixels)	Proportions %	Progressive coverage (corrected) ¹		Comments
-5.0 – -3.0	2100	0				$\leq \approx 600$ px/tonne
-3.0 – -2.5	530	0				
-2.5 – -2.0	550	0				
-2.0 – -1.5	500	0				
-1.5 – -1.0	3700	3100	0.8%	0.8%		< 0 °C
-1.0 – -0.5	21800	64600	18%	18.8%		
-0.5 – 0	44000					
					0.34 °C (50%)	Mean (GMST2022)
0 – 0.5	133000	132400				> 0 °C
0 – 1.0	192500	191900	37%	55.7%		
0.5 – 1.0	105000	104400	53%			
1.0 – 1.5	19300	18700				
0.5 – 2.0			39%	94.6%		
1.5 – 2.0	4300	3100				$\leq \approx 600$ px/tonne
2.0 – 2.5	1100	0				
2.5 – 3.0	620	0				
3.0 – 5.0	2100	0				
Totals	338600	326800	92%	94.6%		<i>Without Poles</i>

¹ Corrected by $\approx 2\%$ for the total surface difference to (a).



Figure 1. Map of the WMO stations in a portion of Europe: their data are most of the sources of data included in the international databases used by IPCC, NOAA, HadCRUT, NASA, etc. [18]

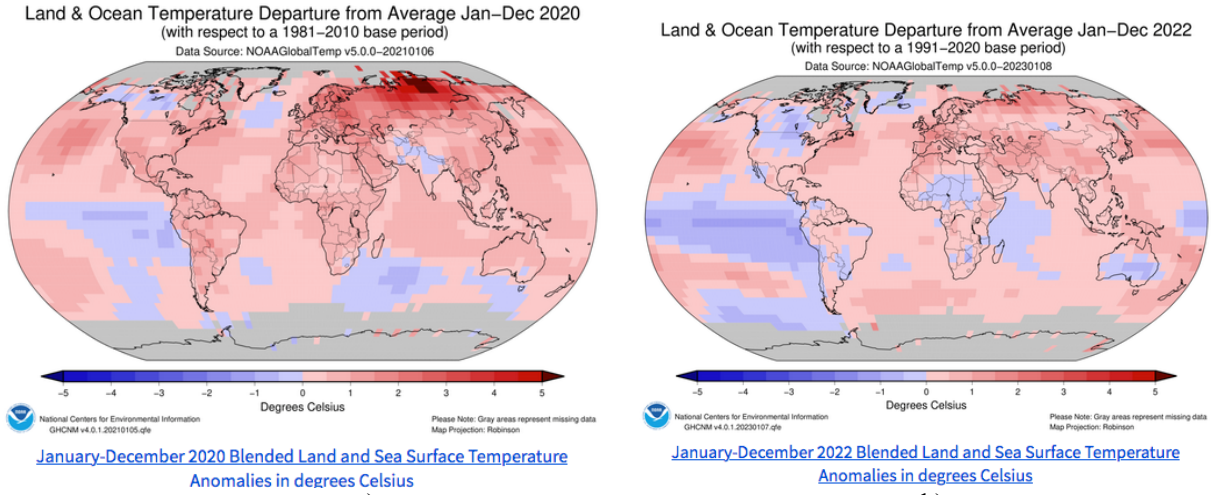


Figure 2. Maps from different periods: (a) 2022 (1981–2010); (b) 2022 (1991–2020). (NOAA)

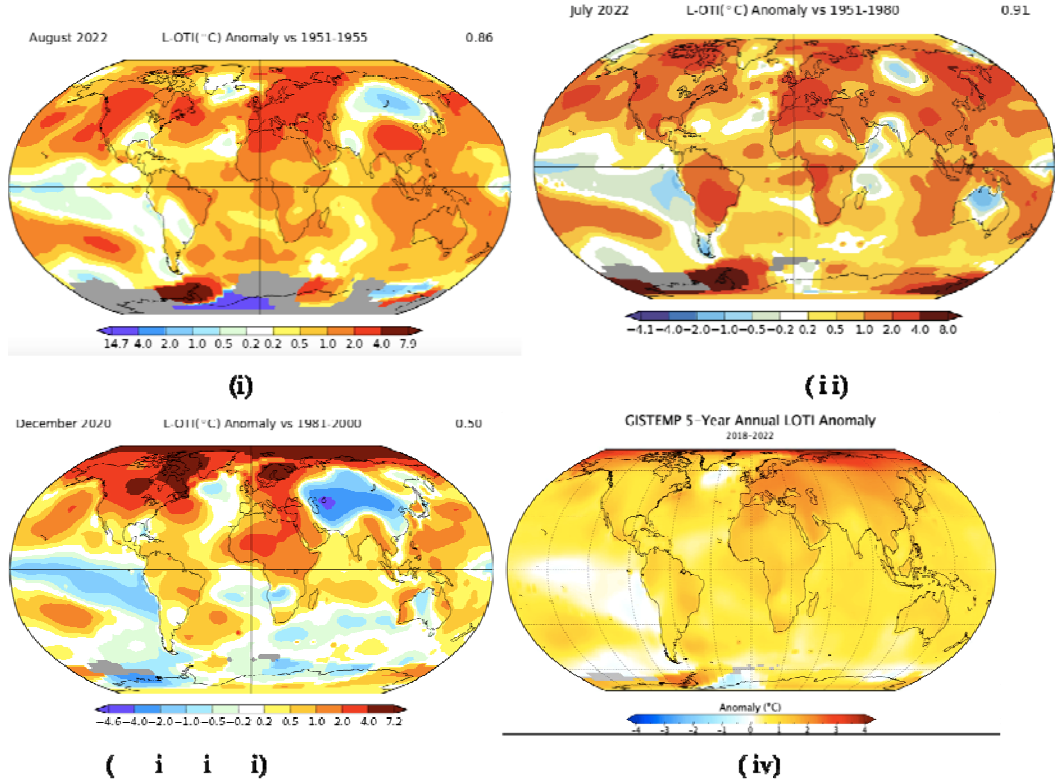
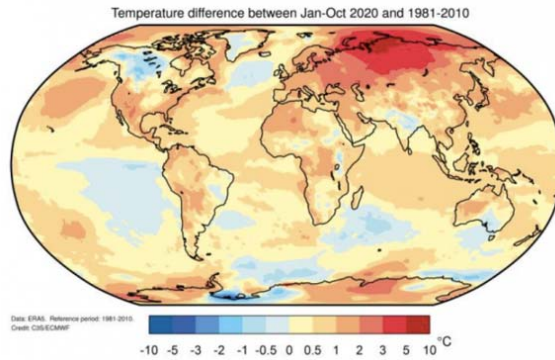


Figure 3a. Maps from another source: GISTEMP L-OTI (NASA) [35]: (i) 2022 (ref. 1951–1955); (ii) 2022 (ref. 1951–1980); (iii) 2020 (ref. 1981–2000); (iv) 2018–2022.



(a)

Figure 3b. Maps from another source: HadCRUT [27] (2020), the reference is the same period of NOAA 2(a): 1981–2010.

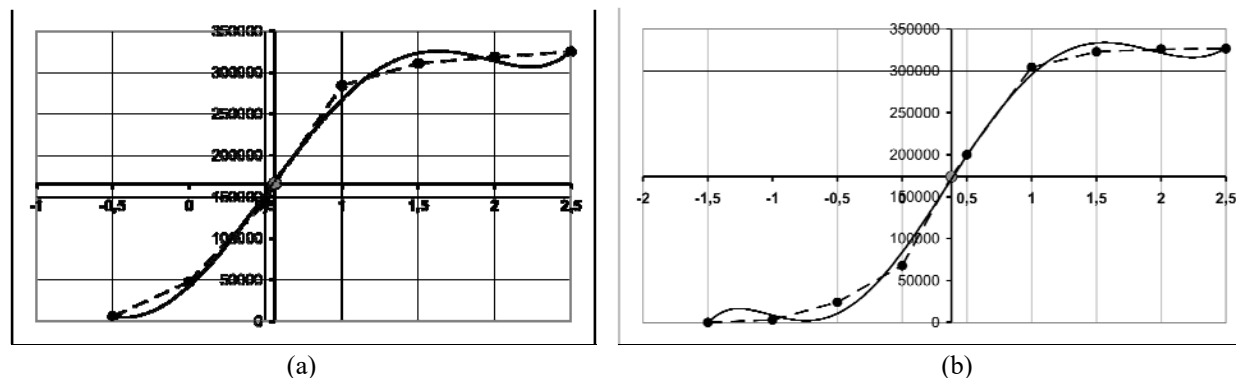


Figure 4. From Fig. 2. The re-computed GMST value (larger gray dot) is reported at the axes crossing (of the graph $\Delta T/^{\circ}\text{C}$ vs pixel count), here respectively $+0.56^{\circ}\text{C}$ and $+0.38^{\circ}\text{C}$. The continuous curve is the interpolation of the measured pixel counts (here dots) of Table 3.

References

1. IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (eds.)]. Cambridge University Press.
2. Pavese F. Big Data and Dataism: some metrological reflections. On AMCTM XIII (Pavese F Bosnjakovic F, Alves Sousa J, Eichstädt S, Forbes AB, Eds.) **13**. Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. World Scientific, 2024. Singapore. pp. 119–129.
3. Amr Magdy (2019) Spatial Big Data management: a brief history, state and applications, pp. 1–136. Report slides. University of California. www.cs.ucr.edu/~amr.
4. Shah P (2019) Developing Big Data Analytics Architecture for Spatial Data. Proceedings of the VLDB 2019 PhD Workshop. August 26th. Los Angeles. California. www.eur-ws.org/Vol-2399/paper03.pdf.
5. Morales C, Sanchez-Paus Díaz A, Dionisio D, Guarnieri L, Marchi G, Maniatis D, Mollicone D (2023) Earth Map: A Novel Tool for Fast Performance of Advanced Land Monitoring and Climate Assessment. J Remote Sensing (3) Article 0003. <https://doi.org/10.34133/remotesensing.0003>.
6. Bolinska A (2016). Successful visual epistemic representation, Studies in History and Philosophy of Science Part A, **56** pp. 153160. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2015.09.005>.
7. Kulvicki J (2010). Knowing with images: Medium and message. Philosophy of Science, **77** pp. 295313. <https://doi.org/10.1086/651321>.
8. Jebeile J (2018). Explaining with simulations. Why visual representations matter, Perspectives on Science, **26:2**, https://doi.org/10.1162/POSC_a_00273.
9. <https://www.interaction-design.org/literature/book/the-encyclopedia-of-human-computer-interaction-2nd-ed/data-visualization-for-human-perception>.
10. Unwin A (2020). ‘Why Is Data Visualization Important? What Is Important in Data Visualization?’. Harvard Data Science Review. **2** (1). <https://doi.org/10.1162/99608f92.8ae4d525>.
11. Kuorikoski J (2011) Simulation and the Sense of Understanding. In Humphreys & Imbert (eds.), Models, Simulations, and Representations. Routledge.
12. Börner K (2010) Atlas of Science: Visualizing What We Know. Book pp. 288. Mit Press.
13. Corné van Elzakker PJM (2004) The use of maps in the exploration of geographic data, Netherlands Geographical Studies **326**, Dissertation pp. 208. Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap/ Faculteit Geowetenschappen, Universiteit Utrecht / International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. ISSN 0169–4839
14. T. Nocke, T. Sterzel, M. Böttinger, M. Wrobel (2008) Visualization of Climate and Climate Change Data: An Overview. Computer Science, Environmental Science, Digital Earth summit on geoinformatics, pp. 226–232.
15. Pavese F (2020) Graphic method for retrieval of quantitative data from computer-mapped qualitative information. With a NASA video as an example. ESIN **13** pp.655662.
16. Wikipedia, Global surface temperature. https://en.wikipedia.org/wiki/Global_surface_temperature. Consulted on June 9, 2024
17. Pavese F. A metrological reflection on uncertainty about the use of maps instead of global parameters // Ukrainian Metrological Journal, 2023, No 4, pp. 49–54. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2023.298672>.
18. WMO (2018) Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume I –Measurement of Meteorological Variables. WMO N° 8. Ed. ISBN 978–92–63–10008–5. <http://public.wmo.int/en/resources/>.
19. Pavese F (2022) U Uncertainty in case of lack of information: extrapolating data over time, with examples of climate forecast models // Ukrainian Metrological Journal, 2022, No 3, 3–8. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2022.269537>.
20. Mastrandrea MD, Field CB, Stocker TF, Edenhofer O, Ebi KL, Frame DJ, Held H, Kriegler E, Mach KJ, Matschoss PR, Plattner G-K, Yohe GW, Zwiers FW (2010) Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

21. Rehg W, Staley K (2017) 'Agreement' in the IPCC Confidence measure, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **57** pp.126–134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.shpsb.2016.10.008>.
22. Grégis F. Do quantities have unique true values? The problem of non-uniqueness in measurement // *Measurement*, 2023, **221** pp. 113498. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113498>.
23. Leroy M (2013), Sustained Performance Classification for Surface Observing Stations on Land (in WMO, 2013).
24. Lacombe M, Bousri D, Leroy M, Mezred M (2011) Instruments and Observing Methods report No. 106 WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments, WMO/TD– No. 1579, IOM Report No. 106, World Meteorological Organization, Geneva Switzerland.
25. Leroy M (2010) Instruments and Observing Methods Report No. 104, in: Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO–2010).
26. Leroy M (1999) Technical Note No. 35: Site Classification, Meteo France.
27. World Meteorological Organization (1998) WMO Intercomparison of Present Weather Sensors/Systems: Final Report (Canada and France, 1993–1995) (M. Leroy, C. Bellevaux and J.P. Jacob). Instruments and Observing Methods Report No. 73, WMO/TD–No. 887, Geneva.
28. World Meteorological Organization (2020) Siting Classification for Surface Observing Stations on Land.
29. Private Communication from a WMO Officer.
30. Pavese F (2023) The choice of cartographic system on the calculation of Earth's surface parameters from maps, namely of the GMST. *ESIN* 16(4): 1–7 <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01061-0>.
31. Wikipedia (2023) Gall–Peters Pd. Accessed 1 March 2024.
32. <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/equal-earth/>.
33. Frank P. (2010) Uncertainty in the global average surface temperature index: a representative lower limit. *Energy Environ* **21** (8): 21.
34. Pavese F., De Bièvre P† (2014) Diversity of thought in measurement. On Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X, **10** (Pavese F, Bremser W, Chunovkina AG, Fischer N, Forbes AB, Eds.), Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences vol. 86, World Scientific, Singapore, 2015, pp 1–8. ISBN: 978–981–4678–61–2.
35. NASA (2023) GISTEMP v4 Figures. <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

Надійшла (Received) 23.10.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 15.11.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Павезе Франко – PhD., незалежний науковець, (колишній директор з досліджень у CNR) м. Турін, Італія; e-mail: fpavese@gmail.com, ORCID: 0000–0001–9261–6862.

Pavese Franko – PhD, Independent Scientist (former Researc Director at CNR), Torino, Italy; e-mail fpavese@gmail.com, ORCID: 0000–0001–9261–6862.

Карти можуть краще підтримувати кількісну оцінку характеристик поверхні Землі з їх еволюцією в часі, ніж глобальні числові параметри Франко Павезе

Анотація

Глобальні числові параметри останнім часом стали більш популярними в наукових галузях для оцінки характеристик поверхні Землі, зокрема в еволюції клімату. Однак вони можуть не повністю відображати складність питання, яке вони мають на меті кваліфікувати. У статті ілюструється той факт, що поставленої мети можна краще досягти, додавши допомогу, яку надає оцінка карт, особливо у випадку параметрів Землі, метод, який вже поширений в оцінці просторових великих даних. Крім того, той факт, що графічне представлення карти є внутрішньо посередником параметра, який завжди пов'язаний з кожними даними експериментального походження, невизначеності даних, таким чином представляючи собою своєрідний альтернативний спосіб моделювання бази даних. Особливо, коли карти ілюструють велику різноманітність локальних ситуацій, візуальне (тобто геометричне) дослідження, яке пропонують карти, часто дозволяє отримати кращу інформацію, тому більш надійну та повну оцінку еволюції, як правило, в часі. Наведено приклади випадків, що підтверджують ці твердження.

Ключові слова: глобальний числовий параметр; невизначеність даних; карти Землі; просторовий розподіл параметрів; якісна оцінка; кількісна оцінка.

A METHOD FOR NOISE ESTIMATION IN A MULTICHANNEL MEASUREMENT INFORMATION SYSTEMS USING SINGULAR VALUE DECOMPOSITION OF THE DATA MATRIX

O. Poliarus, O. Koval, Ya. Medvedovska, A. Koval

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Abstract

Noise filtering is extensively applied in both the theoretical and practical aspects of signal processing. A much smaller number of scientific works is devoted to the extraction of noise from realizations of random processes in order to analyze them for specific tasks. The paper presents a method for separating signals and noise in multichannel measurement systems. The method utilizes the experimental data matrix and employs singular value decomposition (SVD) to analyze both the singular modes of the matrix and the partial matrices that comprise it. The conditions under which a partial first-order matrix describes signals in the system channels, and higher-order matrices contain noise components, have been determined. This requires the cosine of the angle between the data matrix and the first partial matrix must approach unity, and between the data matrix and the second matrix - to zero. Such conditions are achieved when the signal-to-noise ratio exceeds a threshold value. In some cases, the extracted noise can be utilized to determine measurement errors.

Keywords: data matrix, multichannel measurement system, noise filtering, singular value decomposition (SVD).

Introduction

In practical applications, multichannel measurement information systems (MMIS) are extensively used across various technical objects. These systems are capable of measuring either homogeneous parameters, such as pressure, or heterogeneous parameters, such as pressure, acceleration, and force. In the latter case, all physical quantities are normalized to ensure that parameters in all measurement channels are dimensionless. Experimental results, represented as realizations of random processes, contain data describing the physical process being measured, as well as noise. In most cases, the researcher is primarily interested only in the parameters of the random process. The presence of noise in measurement channels distorts the signals; however, in certain cases, its characteristics can provide useful information. In practice, it includes both internal and external noises, as well as random measurement errors, which are generally difficult to separate from the noise. The ideal situation would be one in which the main signals, noise, and measurement errors are fully separated. Measurement errors and noise characterize the uncertainty in the data. They are often closely related and may exhibit similar effects. In general, it is not possible to completely separate noise from measurement errors. The main reasons for this are the lack of sufficient information about the primary sources of errors and noise in the measurement system. Errors arise due to imperfections in measuring instruments, measurement methods, and the influence of external and internal factors. Random errors, in terms of their characteristics, are very similar to noise. Noise can originate from various sources (electrical, thermal, quantum, etc.) and exhibit different spectral characteristics. It can be either additive or multiplicative. The presence of nonlinear transformation functions in the measurement system can further distort the results. Thus, separating measurement errors from noise is a

challenging task that requires a deep understanding of both the physical processes generating the data and the mathematical methods used for data processing. The choice of an appropriate method depends on the specific problem and requires experimental validation. In the following, random measurement errors and noise will be collectively referred to simply as “noise,” and we will analyze the possibility of separating the signal from the noise contained in multidimensional data.

The aim of this paper is to develop a method for assessing noise in a multichannel measurement information system based on singular value decomposition.

Problem Statement

Although complete separation of noise from measured results is impossible, there are a number of general methods that can reduce its impact. These methods include, in particular:

- Identification and analysis of possible sources of systematic and random errors;
- Calibration, i.e., comparing measurement results with reference values to determine and correct systematic errors;
- Performing repeated measurements and calculating the mean value to reduce the impact of noise on the signal;
- Using statistical data processing methods, including calculation of variance, standard deviation, confidence intervals to assess measurement accuracy, evaluation of skewness and multimodality, and checking distribution laws;
- Filtering to reduce the influence of noise components on the signal;
- Creating mathematical models of measurement processes to evaluate the impact of various factors on the results;

- Decomposition of data into empirical modes for analyzing non-stationary signals;
- Wavelet transforms for decomposing the signal into components with different frequencies and localizing signal features in time;
- Using a priori information about the signal and noise;
- Machine learning for pattern recognition in data and separating signal from noise;
- Clustering methods for dividing measurement data into groups with similar characteristics;
- Spectral analysis to identify periodic components that may be associated with systematic errors or external disturbances.

In many cases, it is advisable to combine different approaches and methods.

The general main drawbacks of existing noise filtering methods are:

- Loss of useful information, especially at low signal-to-noise ratios;
- Subjectivity in evaluating the quality of filtering due to the absence of a single universal criterion;
- Dependence of filtering efficiency on the type of noise present in the signal;
- Complexity in tuning filter parameters;
- Computational complexity, particularly for large data sets, such as in MMIS.

Each method has its limitations; for example, adaptive filters require a large amount of training data, while wavelet analysis is sensitive to the choice of decomposition basis. Recently, deep learning based on neural networks and adaptive methods grounded in data analysis, particularly Data Mining, have been employed. Analyzing large sets of data and filtering noise in MMIS requires consideration of alternative approaches, one of which, based on singular value decomposition, is presented in this paper.

Analysis of Recent Publications

A large number of scientific works are devoted to noise analysis in multichannel systems. In [1], a method for assessing the state of multichannel singular systems with multiplicative noise was developed based on singular value decomposition (SVD), taking into account dynamic and multiplicative noise, as well as measurement noise caused by measurement errors. The evaluation of multiplicative noise in the absence of information about input signals is carried out in [2] using a filter optimized according to the minimum mean square error criterion. The Kalman filter is also widely used in singular systems [3], where measurements consist of instantaneous and delayed observations, and the system includes multiplicative noise. In singular systems, the dynamics are described by a combination of algebraic and differential equations. The complex nature of singular systems poses many challenges for both analytical and numerical treatment of such systems [4]. Uncertainties in measurement systems are considered as

multiplicative noise [5], and the least squares method is used for sensor optimization. Many articles have proposed algorithms for noise reduction. In [6], a filter based on SVD and the minimization of the mean square error (MSE) between the desired part of the signal and the sum of the filtered microphone signals is applied to improve speech intelligibility. Singular value decomposition and the principal component analysis (PCA) method have limited noise reduction capabilities under conditions of strong interference. For such conditions, multichannel SVD is used in [7] to obtain multiple signals constructed based on third-order tensors. Noise reduction is simplified when the system models are known, for which identification algorithms of multichannel measurements are developed in [8]. To reduce impulsive noise, a multichannel system for estimating damped sinusoids is proposed in [9]. Even a single-channel measurement system can be transformed into a virtual multichannel system, and SVD can then be applied [10] for “blind” signal separation. At the same time, alongside the use of SVD, it is advisable to reduce the dimensionality of the data matrix, as done, for example, in seismic signal processing in [11]. In [12], a method based on a modified Levinson algorithm is proposed, which does not require assumptions about the highest order of measurement channels with a finite impulse response. To improve the robustness of multichannel systems against modeling errors, a linear minimum variance estimator is described in [13]. The simplification of multivariate time series analysis is achieved through the use of the variational mode decomposition algorithm, which allows decomposing time series into several modes that possess specific spatial properties characteristic of a particular time series [14]. The SVD method is also applied to Hankel matrix sets for noise removal and normalization of the corresponding spaces [15]. To improve noise suppression efficiency in multichannel systems, the paper [16] proposes Regenerative Multidimensional Singular Value Decomposition, which maps measured signals into multidimensional data. The data is processed using Independent Component Analysis. Universal methods for analyzing signals with noise are becoming increasingly relevant. In [17], approaches for extending the use of adaptive Fourier decomposition with a predefined basis in multichannel systems are presented. The approach proposed in [18] for “blind” identification of autoregressive models uses the current autoregressive information model, which is extracted from correlation matrices. It does not require the Toeplitz channel convolution matrix, which is traditionally used in classical methods. At present, different types of noise are suppressed separately. In [19], a noise removal scheme is presented that takes into account their variance and signal-to-noise ratio. The scheme employs a threshold wavelet value and adaptive filtering of multi-source noise based on singular values. To reduce the impact of noise on deconvolution and improve image resolution, a multichannel deconvolution method is used [20].

Noise reduction methods using SVD are widely applied in various fields. For example, to extract fault features in technical systems and obtain their quantitative assessments, [21] proposes an algorithm for tensor SVD of multidimensional time series. The extraction of mechanical fault features based on multichannel measurement information systems (MMIS) is carried out in [22] using an adaptive tensor estimation model. The detection of damage in vibrating structures with different degrees of freedom is implemented in [23] based on recursive singular spectral analysis combined with autoregressive modeling. To extract fault signals from noise, [24] forms a tensor in the phase space and analyzes the principal components with suppressed noise based on tensor SVD. In [25], a new multichannel method for classifying mechanical fault signals is proposed, based on an extended quaternion singular spectrum. Here, quaternions are used to link signals from four channels. To address the mode-mixing problem in multidimensional empirical mode decomposition, [26] employs quaternion singular spectral analysis. It efficiently extracts the characteristic frequency of the fault from multi-channel signals.

Matrix SVD methods are applied in audio systems. In [27], a “blind” dereverberation method based on generalized spectral subtraction is used for noise suppression to improve speech recognition. To reduce vocal noise, [28] presents a comparative analysis of Wiener filtering, spectral subtraction, least squares methods, and digital filters. SVD methods are particularly intensively implemented in the medical field. In [29], it is shown that tensor decomposition of multichannel electroencephalography data can be used to analyze epileptic spikes. In [30], a method for reducing impulsive noise in electrical impedance tomography is described, replacing linear filters with an SVD-based decomposition filter. In [31], a model of multichannel skin conductance recording is developed for autonomic nervous system diagnostics, along with a multichannel deconvolution approach for sparse noisy data to generate reliable conclusions.

Information on blood pressure and other physiological parameters is obtained using multichannel sensors. To suppress noise in such systems, [32] proposes a PCA algorithm with dynamic weighting of signals across channels. In [33], an approach based on extended Kalman filtering and SVD is proposed to extract the fetal electrocardiogram from the maternal cardiogram under conditions of arrhythmia in both the fetus and the mother. In [34], SVD is used for the decomposition of extended multichannel surface electromyography signals based on minimum MSE estimation and convolution kernel compensation. A parallel computation method for determining background noise and detecting lung rales is presented in [35]. The data matrix is factorized, and the rale detection problem is solved simultaneously with noise suppression, maintaining orthogonalization during simultaneous source separation. Recently, intelligent methods have been increasingly implemented in all noise

filtering applications. For instance, in [36], deep machine learning is applied to single-channel systems to estimate the number of signal sources in the presence of noise.

Thus, the main focus of recent scientific studies on the topic under consideration is the reduction or suppression of various types of noise in MMIS. This article analyzes a method for noise level reduction and also considers the possibility of using noise in the assessment of uncertainty or measurement errors in MMIS.

Problems of Signal and Noise Separation in Big Data

A multichannel measurement information system is considered, which measures one or several physical quantities over a period of time. The experimental results are recorded in a data matrix, which in some cases can have very high dimensionality. This raises the problem: under what conditions and how can useful signals be separated from noise based on these results?

Let this data matrix \mathbf{A} have dimensions $m \times n$, where m is the number of rows of the matrix, which in practice corresponds to the number of measurement channels, and n is the number of time samples, into which the realization of the random process is divided over the given time interval.

The experimental data matrix \mathbf{A} can be represented as [37]

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T, \quad (1)$$

where the unitary matrices \mathbf{U} and \mathbf{V} contain the left and right orthonormal singular vectors, respectively, such that $\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{I}$ and $\mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I}$, where \mathbf{I} is the identity matrix. The left singular vectors describe the basis of the row space of the matrix \mathbf{A} . They demonstrate a way of linearly combining the rows to obtain the principal components. The right singular vectors describe the basis of the column space of the matrix and indicate how the columns should be linearly combined to obtain the principal components. Geometrically, the left and right singular vectors determine the directions of maximum data variance in the row and column spaces, respectively. The singular vectors indicate the variables (factors) that have the greatest impact on the output parameters and their interaction patterns. These vectors can be used to construct a new data basis in which the data exhibit a simpler structure.

The singular values of the matrix $\mathbf{\Sigma}$ characterize the amount of data compression along each principal component and essentially serve as an indicator of the importance of these components. They are always non-negative and arranged in descending order. Intuitively, large singular values correspond to the main features of the measured data, while small singular ones are associated with noise or less important factors. The larger the singular value, the more information it contains. By discarding components with small singular values, one can reduce the dimensionality of the data without significant loss of information. If the data contain anomalies, this manifests as unexpected singular values of the matrix \mathbf{A} .

The equation (1) provides a mathematical description of the SVD method for the matrix \mathbf{A} . If the dimensionality of the data matrix \mathbf{A} is $m \times n$, then the dimensionality of the matrix \mathbf{U} is $m \times m$, and matrix \mathbf{V} is $n \times n$. The dimensionality of the matrix Σ coincides with that of the matrix \mathbf{A} . If the dimensionality of the matrix \mathbf{A} becomes very large, there exists a method to reduce its order without losing measurement information. Most singular values are equal to zero, and this property is used when reducing the dimensionality of the matrix \mathbf{A} . If the matrix \mathbf{U} vectors \vec{u}_i and matrix \mathbf{V} vectors \vec{v}_i are known, the matrix \mathbf{A} will be presented in the form [37]

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^p \sigma_i \vec{u}_i \vec{v}_i^T, \quad (2)$$

where p is the number of modes, and σ_i is the singular value for the i -th mode. The expression (2) in expanded form:

$$\mathbf{A} = \sigma_1 \vec{u}_1 \vec{v}_1^T + \sigma_2 \vec{u}_2 \vec{v}_2^T + \dots + \sigma_p \vec{u}_p \vec{v}_p^T = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \dots + \mathbf{A}_p. \quad (3)$$

In practice $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p$, and often $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_p$. The first term in relation (3) usually significantly exceeds the other terms. It is determined by the basic physical processes occurring at the technical object whose parameters are being measured. The largest singular values and their corresponding vectors represent the principal modes or dominant patterns in the data. Smaller values correspond to secondary modes that capture less variance in the data. Some secondary modes may represent not errors but subtle regularities in the data. It is important to note that there is no clear boundary between principal and secondary modes.

The real data contained in the matrix \mathbf{A} , describe the main physical processes as well as noise (including measurement errors). The matrix can be represented as the sum of a matrix responsible for these processes and a matrix whose elements are noise. Therefore, operation (1) represents the SVD of a sum of matrices, which is generally a nonlinear operation, since such a decomposition is not a linear combination of the elements of the original matrix \mathbf{A} . The singular values of the matrix \mathbf{A} , located on the diagonal of the matrix Σ , are the square roots of the eigenvalues of the matrix $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$.

The result of the SVD for the sum of matrices depends not only on the individual singular values and vectors of each matrix but also on their interaction. Computing the SVD for large matrices is a computationally expensive task, and for a sum of matrices, this complexity can increase even more. The singular values of a matrix determine its "importance" in various subspaces. When we add matrices, their singular values interact in a complex way: some may be amplified, others weakened, and new singular values may even appear. SVD defines orthogonal bases described by the singular vectors contained in the matrices \mathbf{U} and \mathbf{V} . When matrices are added, these bases change because the new matrix has a different structure. Each singular value

and its corresponding singular vectors in the SVD have a specific interpretation. For the sum of matrices, this interpretation can be more complex, as it reflects the interaction of different components. Because of adding matrices, there may also be a loss of information about the structure of the individual matrices, especially if the matrices have different ranks or their singular values differ significantly. The rank of the sum of matrices may differ from the sum of the ranks of the individual matrices, which also affects the outcome of the SVD.

In practice, decomposing a complex matrix into a sum of simpler matrices often allows one to simplify the model and improve its interpretability. However, the SVD of such a sum is not a simple linear combination of the SVDs of the individual matrices. In data analysis, SVD is often used for dimensionality reduction and for uncovering latent structures. SVD of time series makes it possible to identify various trend components. Applying SVD to the sum of matrices is useful for constructing models that take into account different types of information contained in the individual matrices.

Thus, the matrix \mathbf{A} can be exactly decomposed into components according to formula (2). This formula is, in fact, an extended interpretation of formula (1). If SVD were a linear operator, then in many cases the matrix \mathbf{A}_i ($i = 1, 2, \dots, p$) would correspond directly to the influence of the i -th factor. Due to the nonlinearity of SVD, such a conclusion cannot always be made. From a technical standpoint, operations (1) and (2) describe a system where the measured data in the form of matrix \mathbf{A} , is input, and the output consists of the singular values σ_i which characterize the energetic properties of the decomposition modes (3), as well as the orthonormal vectors \vec{u}_i and \vec{v}_i . The relationship between σ_i , \vec{u}_i , \vec{v}_i and the elements of matrix \mathbf{A} is nonlinear. Essentially, one needs to estimate the measured data contained in \mathbf{A} based on the compressed information σ_i , \vec{u}_i and \vec{v}_i . This problem is extremely broad. In this paper, a method is developed for partial separation of useful signals and noise in a multichannel measurement information system based on information about the singular values and orthonormal vectors of the data matrix.

The method is based on obtaining the singular modes and the hypothesis that the first mode, which significantly exceeds all other modes in terms of energy, contains information about the main physical process whose parameters are being measured. Higher-order modes describe secondary processes, measurement errors, and noise. Separating them in practice is challenging. Therefore, we first perform an analysis of the influence of these factors on the characteristics of the SVD components. The research plan includes the following stages:

1. Creating models of measurement signals in MIMS without and with noise, and forming data matrices.
2. Determination of singular values and orthogonal vectors for all data matrices.
3. Identification of patterns in the behavior of singular values and orthogonal vectors depending on

measurement signal models.

4. Development of guidelines for noise estimation based on SVD and signal-noise separation methods.

5. Experimental verification of the proposed method.

Signal models

Among the different types of signals, we will first select the simplest ones, and then test the effectiveness of the proposed method on more complex models.

Case 1: Constant signals in measurement channels. There are various variants of constant signals, one of which is constant signals with the same amplitude in all channels. This is a special case, while in practice the signal amplitudes usually differ across channels. Therefore, to demonstrate the method, we choose signals with the following amplitudes in five channels: 2; 2,5; 3; 4; 5. The application of formula (1) for decomposition gives one mode with a singular value of 245,5815. If the amplitudes of the signals in the channels are the same and equal to two, then the singular value is 141,4920 and only the nature of the spatial mode distribution changes.

Case 2: Constant signals with noise. We add identical white Gaussian noise to all signals programmatically in MATLAB (Fig. 1). Since the signal amplitudes in the channels are different, the signal-to-noise ratio (SNR) q also varies across channels. In this example, the average value of q is 0,836 (the average noise amplitude is greater than the average signal amplitude).

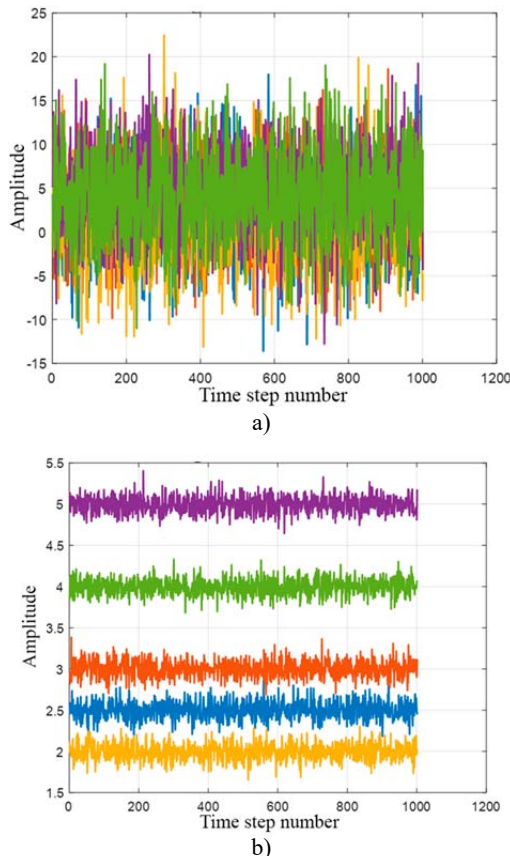


Fig. 1. Distribution of instantaneous signal values in channels

for SNR $q = 0,8$ (a) and $q = 41$ (b).

Unlike constant signals, decomposition (1) yields five modes with singular values shown in Fig. 2, where the index on the x -axis represents the mode number.

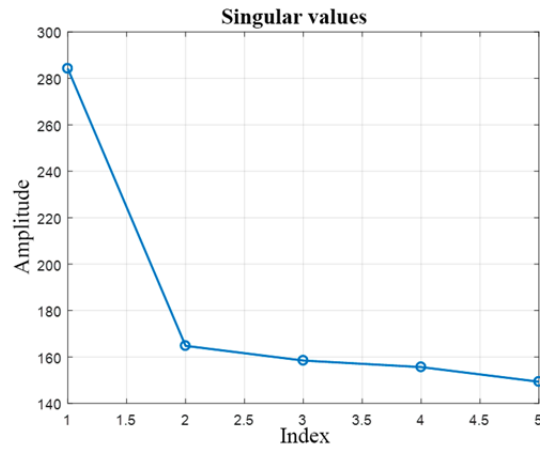


Fig. 2. Singular values of the 5 modes for signals with noise at SNR $q=0,8$

Examples of spatial and temporal modes, determined from the orthogonal matrices U and V , are shown in Fig. 3. These modes define the spatial configuration of the matrix A in a multidimensional abstract space.

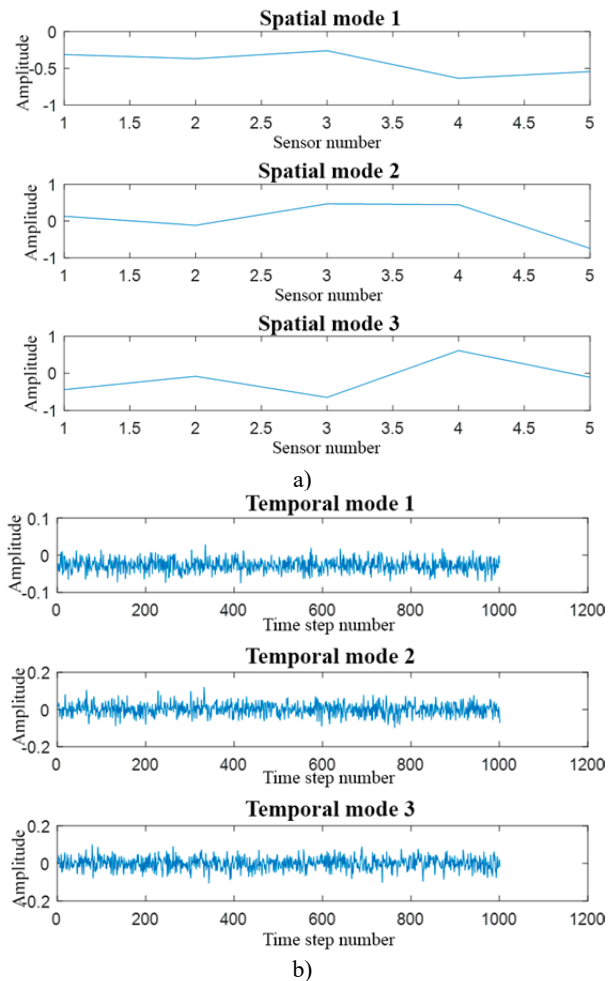


Fig. 3. Example of spatial (a) and temporal (b) modes for a 5-dimensional signal with noise.

The relative energy characteristics of the modes are shown in Fig. 4. Therefore, the first mode contains about 45% of the energy of all other modes, which are almost the same and about three times smaller than the first mode. This indicates the necessity of considering all modes.

The dependence of the largest singular value of the data matrix and the relative energy of the first mode on the signal-to-noise ratio is shown in Fig. 5. As the SNR increases, the singular values stabilize and practically do not change further. Under these conditions, the energy of the first mode increases and gradually approaches 100%.

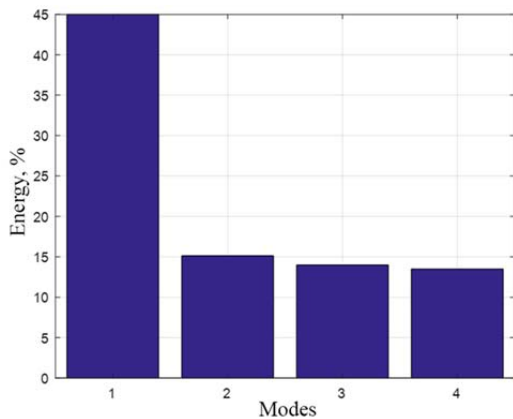


Fig. 4. Relative energy characteristics of the first modes

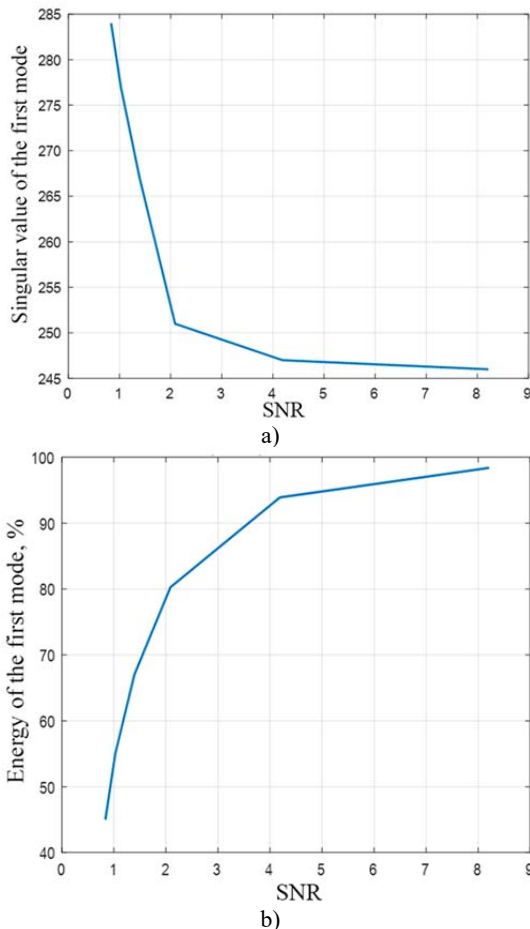


Fig. 5. Dependence of the largest singular value (a) and the relative energy of the first mode (b) on the SNR q

Partial matrices $\mathbf{A}_i (i = 1, 2, \dots, p)$ describe the influence of individual factors on the measured signals. The similarity of these matrices to the data matrix \mathbf{A} in relation (3) can be assessed using the cosine of the angle θ between the matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_i , which is given by the formula [38]

$$\cos\theta = \frac{\langle \mathbf{A}, \mathbf{A}_i \rangle}{\|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}_i\|}, \quad (4)$$

where $\langle \mathbf{A}, \mathbf{A}_i \rangle$ is the scalar product of the matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_i , defined by the formula: $\langle \mathbf{A}, \mathbf{A}_i \rangle = Sp(\mathbf{A}^T \mathbf{A}_i)$.

Here, Sp denotes the trace of the matrix product in parentheses, i.e., the sum of the elements on the main diagonal. The norms of the matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_i are defined similarly: $\|\mathbf{A}\| = \sqrt{\langle \mathbf{A}, \mathbf{A} \rangle}$, $\|\mathbf{A}_i\| = \sqrt{\langle \mathbf{A}_i, \mathbf{A}_i \rangle}$. The similarity of matrices is an analogue of their correlation and its description in terms of the cosine of the angle between the matrices is a convenient tool for multichannel systems. Figure 6 shows the dependence of $\cos\theta$ on the SNR. If the angle $\theta = 0^\circ$, and $\cos\theta = 1$, the matrices coincide; conversely, if $\theta = 90^\circ$ and $\cos\theta = 0$, the matrices completely lose similarity.

At low signal-to-noise ratios, the cosine of the angle between matrix \mathbf{A} and the matrices $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ is approximately the same. This means that under conditions of strong noise, the partial matrices $\mathbf{A}_i (i = 1, 2, \dots, p)$ do not resemble the data matrix \mathbf{A} ; therefore, their analysis may lead to incorrect conclusions about the measured data. At $q \approx 5$ or higher, the partial matrix closely resembles the data matrix \mathbf{A} (the cosine of the angle θ exceeds 0,95).

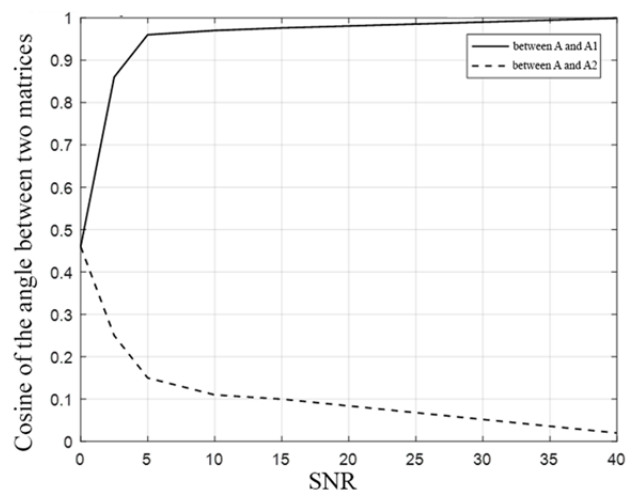


Fig. 6. Dependence of the cosine of the angle between matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_1 (solid line) and between matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_2 (dashed line) on the signal-to-noise ratio q

From this, it follows that many conclusions about the measurement results contained in matrix \mathbf{A} , can be

drawn based on the analysis of matrix A_1 , which is much simpler than the full data matrix and, according to (3), is described by a single mode with singular value σ . The matrix A_1 contains the measurement data responsible for the main physical processes occurring in the object whose parameters are being measured. The matrix A also contains these measurement data, but they are distorted by noise. In fact, at high signal-to-noise ratios, the useful signal is effectively filtered and cleaned of noise. However, the noise is not lost during this filtering and is captured in matrices $A_i (i = 2, 3, \dots, p)$. Since under these conditions $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_p$, from a practical point of view, it is advisable to analyze the noise using only matrix A_2 , but only after ensuring that the experimental results were obtained under high signal-to-noise conditions. The principle of separating noise from the signal can be explained using an analogy.

The matrix A in a multidimensional abstract space can be mentally visualized as a vector, whose amplitude is determined by the singular values concentrated in the diagonal matrix Σ , and whose direction is defined by the orthogonal vector matrices U and V . For clarity, we make a significant simplification and represent the matrix A as a vector \bar{A} on a two-dimensional plane (Fig. 7).

Based on the previous reasoning, this vector can be approximately decomposed into a vector representing the signal, and a vector \bar{A}_2 , representing the noise.

As can be seen from Fig. 7, the vector \bar{A} is nonlinearly related to the vectors \bar{A}_1 and \bar{A}_2 .

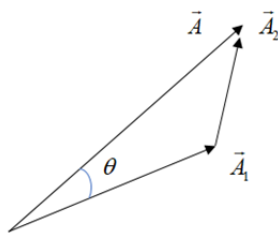


Fig. 7. Simplified illustration of the principle of separating noise from the signal

It corresponds to the geometric sum of these vectors, which is a simplified geometric analogy of relations (2) and (3) under the condition.

At high signal-to-noise ratios, $\cos\theta \rightarrow 1$, and the angle itself $\theta \rightarrow 0^\circ$ (Fig. 7). As soon as the angle θ approaches zero, the vectors \bar{A}_1 and \bar{A}_2 become close to the vector \bar{A} , meaning that instead of the nonlinear operation of forming the geometric sum $\bar{A} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2$ we effectively get an arithmetic sum $A \approx A_1 + A_2$, which can be performed using a linear operation. From this, we conclude that the signal and noise behave additively. The measurement results are contained in a matrix A , which after transformation (1)...(3), go to

the matrices \bar{A}_1 and \bar{A}_2 . Analyzing the matrix A_2 allows us to obtain information about noise, which also includes measurement errors. If external and internal noise is significantly reduced during experiments, analyzing the matrix A_2 makes it possible to estimate measurement errors, which are often difficult to distinguish from noise. The remaining challenge is separating noise from the signal at low signal-to-noise ratios.

Case 3: signals with noise varying across channels. Now consider an example with a different data matrix: instead of constant signals in the measurement channels, there are harmonic signals with varying amplitudes and frequencies, as well as signals with linear and nonlinear amplitude modulation, to which noise is added (Fig. 8).

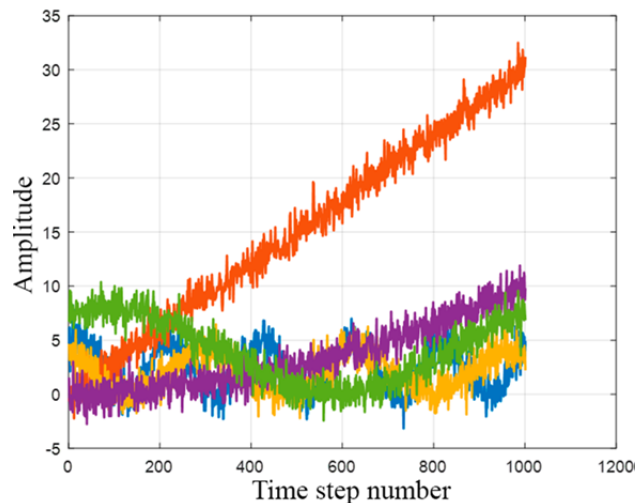


Fig. 8. Realizations of random signals with noise in five channels at $q=4,18$

The average signal-to-noise ratio by amplitude was 4,18.

The distribution of singular values and the relative energy of the modes are shown in Fig. 9.

At this SNR, the cosines of the angles between the matrices A , A_1 and between A , A_2 are 0,9616 and 0,2202, respectively. These values roughly coincide with the corresponding values for constant signals. Similar results are observed for other types of signals at comparable signal-to-noise ratios. Therefore, the similarity of the main data matrix A with the partial matrices A_i primarily depends on the energy characteristics of the modes (i.e. SNR) rather than on the specific shape of the signals.

Case 4: Analysis of Experimental Studies. Consider the results of two experimental studies conducted by the authors.

The first experiment used a measuring complex containing four digital strain gauges to measure the deformation of a mechanical installation. Four realizations of a non-stationary random process were

obtained (Fig. 10).

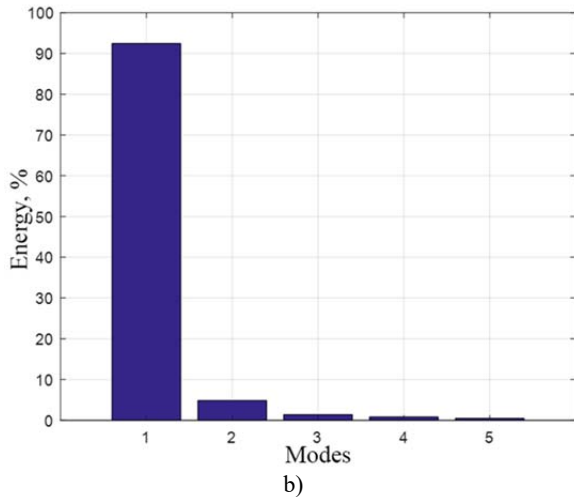
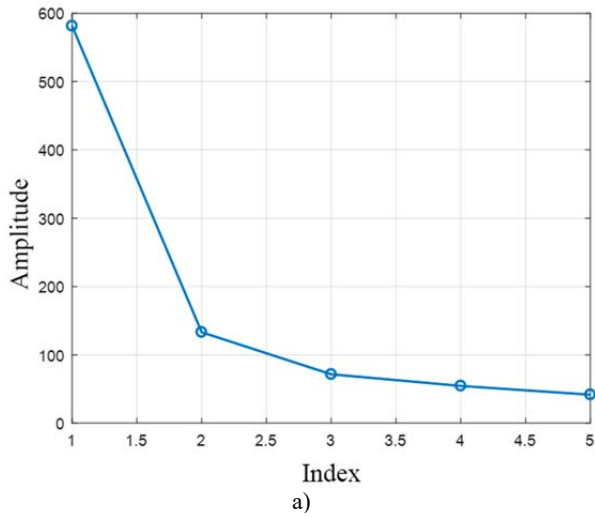


Fig. 9. Distribution of singular values (a) and relative modal energies of the data matrix (b) for the 3rd case

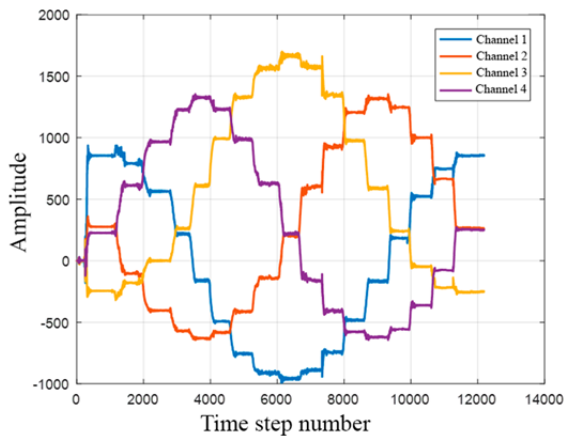


Fig. 10. Time dependencies of the deformations of the mechanical setup

The cosines of the angles between the data matrix \mathbf{A} and the partial matrices \mathbf{A}_i according to formula (4), are:

- Between \mathbf{A} and \mathbf{A}_1 : 0,7185.
- Between \mathbf{A} and \mathbf{A}_2 : 0,6050.

- Between \mathbf{A} and \mathbf{A}_3 : 0,3391.
- Between \mathbf{A} and \mathbf{A}_4 : ,0531.
- Between \mathbf{A}_1 and \mathbf{A}_2 : $1,4664 \cdot 10^{-19}$

The singular values of the modes and their relative energy are shown in Fig. 11.

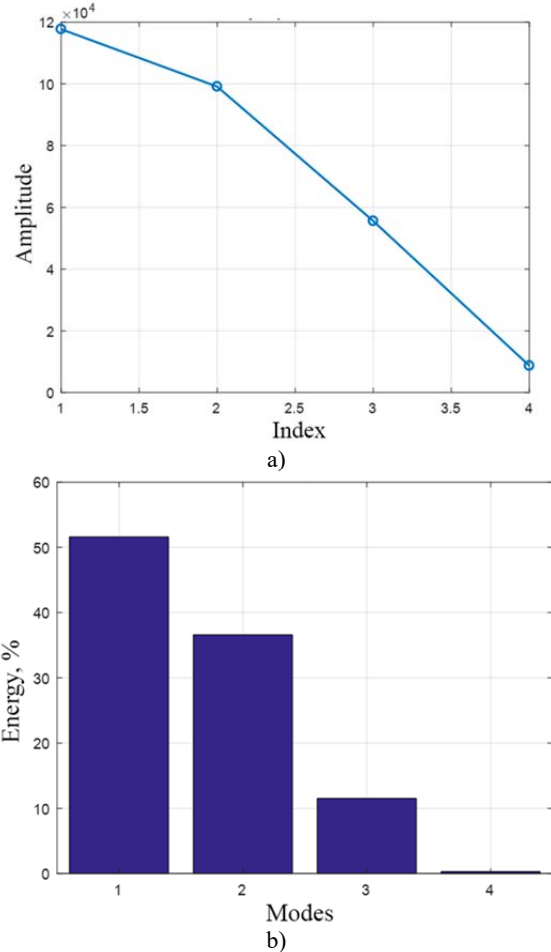


Fig. 11. Singular values of the modes (a) and their relative energy (b) in the first experiment.

This means that the similarity between the data matrix \mathbf{A} and \mathbf{A}_i is preserved practically up to the third partial matrix, while there is no correlation between the partial matrices themselves. The cosine of the angle between matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_1 is particularly significant. In the given experimental study, it equals 0,7185, indicating that one cannot assert a strong similarity between these matrices, and the partial matrices cannot be attributed with noise properties, since their correlation with the main matrix remains high (0,605). All of this reflects the nonlinearity of the SVD transformation.

In the second experiment, stationary pressure processes were studied (Fig. 12).

The realizations of this process are described by a single mode. The cosine of the angle between matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_1 is very close to 1, while between matrices \mathbf{A} and \mathbf{A}_2 it is 0,004. The time dependencies of pressure for matrix \mathbf{A}_1 practically replicate the previous figure. This

indicates that matrix A_1 represents the main physical processes occurring in the setup. Since the similarity between matrices A and A_2 is practically absent, matrix A_2 can be considered to represent noise (Fig. 13).

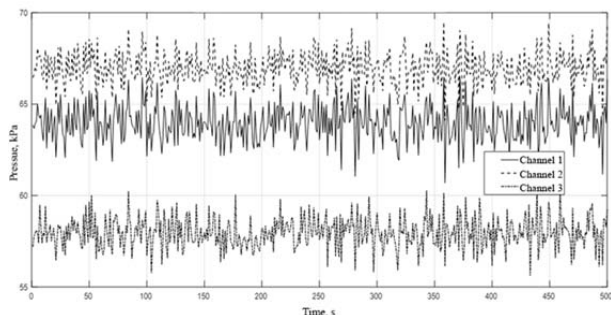


Fig. 12. Time dependences of pressure in three channels of the measuring information system

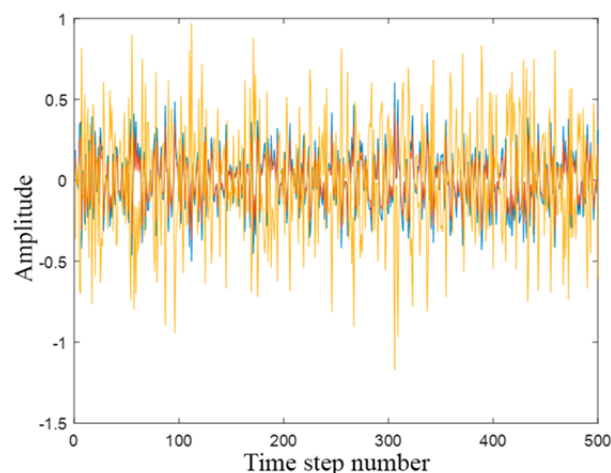


Fig. 13. Instantaneous noise values for the second experiment

Analysis of secondary modes in singular decomposition of a data matrix

Therefore, the analysis method using SVD allows us to identify the main modes in the experimental data, in which a significant part of the energy and information is concentrated. The main modes are associated with essential patterns in the data that likely represent real phenomena under study. However, there are also non-primary (additional, secondary) modes that are usually not analyzed in practice.

Can we assume that secondary modes may describe measurement errors during data collection? There are no theorems that definitively answer this question. In many cases, secondary modes with significantly smaller singular values may characterize noise or measurement errors. The assumption is that the main signal in the data has a larger variance than the noise, and measurement errors are smaller in magnitude than the main components of the signal. However, it is not always straightforward to determine the boundary between signal and noise, or between noise and random errors. It should also be noted that some secondary modes may occasionally represent subtle patterns in the measurement data. To reduce the

impact of SVD nonlinearity, it is necessary to ensure a high value of $\cos \theta \rightarrow 1$. For the first experiment, this condition is not met, whereas for the second experiment, it is fully satisfied. This is due to the non-stationarity of the random processes in the first experiment. As a result, it is impossible to determine the noise in the first experiment using the proposed method, since it contains components of the main mode due to SVD nonlinearity. The second experiment, in contrast, is described by a single mode and is characterized by weak correlation between the data matrix and partial matrices with indices 2 and higher. At the same time, the similarity between matrices A and A_1 is very high. Thus, for separating signal and noise, the described method can be applied provided that $\cos \theta$ between matrices A and A_1 or the relative energy of the first mode exceeds a certain threshold, for example, 0,9 or 90%, respectively. The lower this threshold, the larger the errors in noise determination. To evaluate these errors, we obtain the matrix A_2 at different signal-to-noise ratios. The matrix A_2 at SNR $q \approx 41$ for the second case considered in the article is taken as the reference, i.e., $A_2 = A_{ref}$. For lower SNR q , new matrices are calculated and compared with the reference matrix. When SNR q decreases, some real important signal characteristics may be misclassified as noise if they make a small contribution to the total variance. Thus, the data matrix A contains both signals and noise; the first-order partial matrix A_1 mainly represents signals, while all higher-order partial matrices primarily represent noise, with the highest level occurring in matrix A_2 . If a low level of internal noise in the measurement system is ensured and external noise is absent, matrix A_2 will contain information about random measurement errors or measurement uncertainty. Most systematic measurement errors are difficult to determine with the proposed method, as they may appear in the first-order matrix A_1 . To enable the separation of signals and noise, an appropriate signal-to-noise ratio must be maintained. The reference matrix A_{ref} is illustrated by the dependencies shown in Fig. 14.

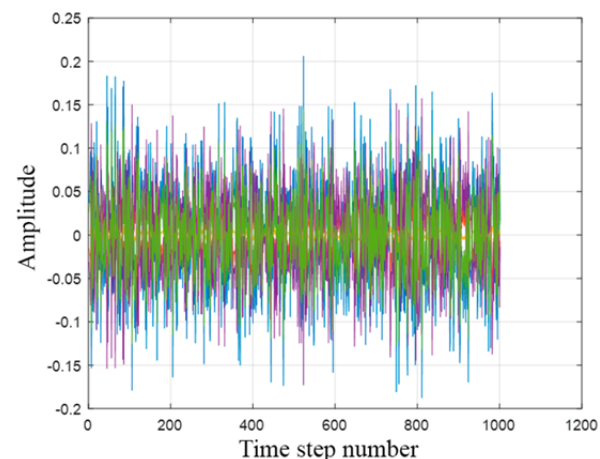


Fig. 14. Time dependences of the parameters of the reference matrix A_{ref} at a signal-to-noise ratio of 41

The time dependences of the matrix \mathbf{A}_2 parameters at other values of q have a similar form. It is advisable to consider the ordinates on all graphs, as they characterize the noise amplitudes. If these amplitudes are large, it indicates that energy is flowing from the first mode to higher-order modes due to nonlinear effects in the SVD process. It is not the amplitude of the noise that matters, but the signal-to-noise ratio.

Fig. 15 shows the dependence of the relative error in noise estimation on q . The relative errors were calculated as the ratio of the maximum value of the matrix \mathbf{A}_2 at the corresponding q to the maximum value of the data matrix \mathbf{A} .

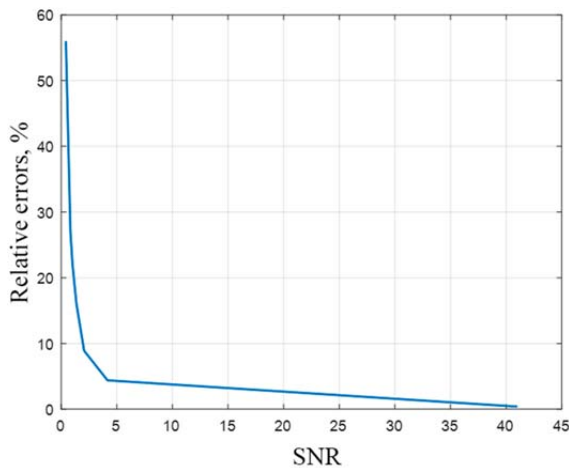


Fig. 15. Dependence of the relative errors in noise estimation on the signal-to-noise ratio

Figure 15 shows that for any data matrix, it is possible to determine conditions under which noise together with measurement errors will not exceed a specified level. Separation of noise and measurement errors in the matrix \mathbf{A}_2 can be done by machine learning methods or other methods if there are any differences between them.

It should be noted that SVD is a popular method for data dimensionality reduction. However, there are other methods, each with its advantages and disadvantages. First, there is the Principal Component Analysis (PCA) [39]. The first few principal components of PCA, corresponding to the largest eigenvalues of the covariance matrix, coincide with the first few left singular vectors of SVD. However, SVD is a more general method and can be applied to arbitrary matrices. Second, there is Linear Discriminant Analysis (LDA) [40], which seeks linear combinations of the original variables that maximize the separation of different data classes. LDA is effective for classification tasks when classes are clearly separated but is less effective for small sample sizes. Third, there is t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding [41], a nonlinear method that preserves the local structure of data in a low-dimensional space. This method is often used for visualizing high-dimensional data, but it can be quite slow for large datasets, and the results may depend on the initial initialization.

Fourth, there are machine learning methods [42] based on neural networks. A hidden layer with fewer neurons performs the dimensionality reduction. Neural network-based methods require large amounts of training data and are prone to overfitting. Each of these methods has its strengths and weaknesses. The choice of method depends on the specific task and requires analysis of the data and research objectives. In some cases, using a combination of methods may be advisable to achieve acceptable results.

To determine the role of each partial matrix in forming noise and measurement errors, a model was constructed in the form of parallel-connected MMIS and a reference measurement information system (RMIS), where measurement errors are approximated as zero. Partial matrices for MMIS are denoted as \mathbf{A}_i , and for RMIS as \mathbf{A}_{in} . The similarity between the data matrices \mathbf{A}_1 and \mathbf{A}_{1n} is already close to one, allowing the analysis of random processes that determine the physical properties of the system under different distributions of noise and measurement errors. The results are presented for a signal-to-noise ratio of 14. The similarity (measured via cosine of the angle) between the matrices \mathbf{A}_2 and \mathbf{A}_{2n} , \mathbf{A}_3 and \mathbf{A}_{3n} , \mathbf{A}_4 and \mathbf{A}_{4n} , \mathbf{A}_5 and \mathbf{A}_{5n} ranges from 0,6976 to 0,7669. Cross-similarity, e.g., between \mathbf{A}_2 and \mathbf{A}_3 , \mathbf{A}_{2n} and \mathbf{A}_{3n} is close to zero. The study is conducted for the case where the level of random errors and noise is approximately equal.

For comparable noise and measurement errors, we consider simulation results with different distributions: noise distributed uniformly, and measurement errors normally. The mixture of noise and errors already deviates from a normal distribution. After singular value decomposition, we obtain practically identical matrices \mathbf{A}_1 for MMIS and \mathbf{A}_{1n} for RMIS, with similarity close to 1, even at a relatively low signal-to-noise ratio (Fig. 16).

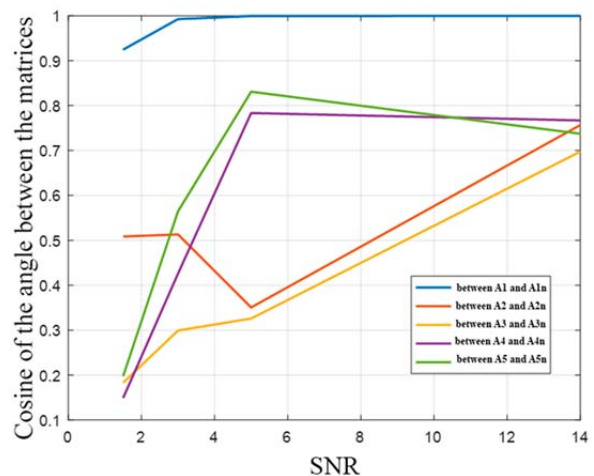


Fig. 16. Dependence of the similarity of different matrix pairs on the signal-to-noise ratio

The similarity between the matrices \mathbf{A}_2 and \mathbf{A}_{2n} , \mathbf{A}_3 and \mathbf{A}_{3n} , \mathbf{A}_4 and \mathbf{A}_{4n} , \mathbf{A}_5 and \mathbf{A}_{5n} at a signal-to-noise ratio $q=14$ is in the range from 0,7 to 0,77 (Fig. 16) and increases at higher q . Therefore, at high SNR, the analysis of noise and measurement errors can be performed using MMIS data alone, without the use of RMIS. At low q , the matrices \mathbf{A}_i for MMIS and RMIS differ, and the similarity between the input data matrix and the noise matrices is low.

It is important to clarify the physical meaning of the noise matrices \mathbf{A}_i , which describe the noise components in MMIS. Since the input data were generated through modeling, the noise and measurement errors are known, and the similarity of matrices \mathbf{A}_i with the actual noise can be determined. This similarity is small (approximately 0,3) and increases only slightly with increasing q . The similarity of these matrices with measurement errors may exceed 0,4 and decreases as the SNR grows. The similarity of matrices \mathbf{A}_m for RMIS with noise is much higher and can exceed 0,5; it may increase with increasing q for \mathbf{A}_{5n} , and decrease for all other \mathbf{A}_m . Their similarity with measurement errors is approximately zero, as expected, since measurement errors were not introduced in RMIS during modeling. This analysis corresponds to the case of measurement errors comparable to noise.

For large noise (a third of the average signal amplitude) and small measurement errors (10 times less noise), in MMIS the similarity of noise matrices with actual noise is in the range 0,44–0,47, and in RMIS 0,42–0,47. The similarity of the noise matrices with measurement errors is close to zero for SNR of 3.

For small noise, 10 times smaller than the measurement errors, at a signal-to-noise ratio of 27, the similarity of MMIS noise matrices with noise is 0,05–0,08, and with measurement errors 0,42–0,46; for RMIS, the similarity with noise is about 0,42–0,45 and near zero with measurement errors, since no measurement errors were assumed in RMIS.

Thus, the analysis of partial matrices from the singular value decomposition of the input data matrix shows the impossibility of clearly assigning these matrices either to noise or to measurement errors. The SVD method does not allow determining the responsibility of the i -th partial matrix ($i = 2, \dots, 5$) for forming noise or measurement errors, which in general cannot be separated using this method. The most favorable case occurs at high q , when the singular values of the first matrix \mathbf{A}_1 are much larger than those of the other partial matrices \mathbf{A}_i for $i = 3, \dots, 5$. In this case, the

matrix characterizes the intensity of measurement and noise errors in the MMIS channels. Thus, SVD allows to reduce the noise level, and the analysis of physical processes can be carried out using the first partial matrix \mathbf{A}_1 instead of the traditional data matrix \mathbf{A} .

The main applications of this method include:

1. Noise filtering. Using only the large singular values to reconstruct the data matrix allows the removal of noise and the extraction of a “cleaned” signal.

2. Estimation of measurement errors. Analysis of small singular values and corresponding partial matrices allows us to estimate the contribution of hardware errors and external interference.

3. Diagnostics of the information-measurement system. Large values of the noise component may indicate sensor malfunctions or calibration problems.

Conclusions

The problem of noise filtering has long been a topic of significant interest. The article considers a method for separating noise from signals in a multichannel measurement information system with the aim of further possible determination of measurement errors that may be similar to noise. It is shown that using singular value decomposition provides a systematic approach to separating signal and noise at a sufficiently high signal-to-noise ratio, although complete separation is not achievable.

In the proposed method, after performing SVD, an analysis of the partial matrices is conducted, whose sum equals the data matrix obtained from multichannel measurements. The data matrix contains both useful signals and noise. It is established that these can be separated if the cosine of the angle between the data matrix and the first partial matrix approaches 1, while the cosine of the angle between the data matrix and the second partial matrix approaches 0. Such conditions are achieved when the signal-to-noise ratio exceeds a certain threshold.

The first partial matrix contains useful signals, while higher-order matrices contain noise. Typically, the noise level in the second partial matrix is much higher than in higher-order matrices. At a low level of internal noise in the multichannel measurement information system, and with external noise removed, the second partial matrix primarily contains random measurement errors. Systematic measurement errors cannot always be determined by the proposed method, as they often enter the first partial matrix along with the useful signals.

The main applications of the proposed method are noise filtering, assessment of measurement errors, and diagnostics of the state of the measurement information system.

References

1. Dongsheng Chu, Shouwan Gao, Lina Guo. State estimation for multi-channel stochastic singular systems with multiplicative noise. – *Asian Journal of Control*, 2010. Vol.12. Issue 6. Pp. 725-733.
2. Yueyang Li, Shuai Liu, Maiying Zhong, Steven X. Ding. State estimation for stochastic discrete-time systems with multiplicative noises and unknown inputs over fading channels. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 320. Pp. 116-130.

3. Xiao Lu, Linglong Wang, Haixia Wang and Xianghua Wang. Kalman Filtering for Delayed Singular Systems with Multiplicative Noise. *IEEE/CAA J. of Autom. Sinica*, 2016. Vol. 3. No. 1. Pp. 51-58.
4. D. Lj. Debeljkovic. Singular control systems. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems. Series A: Mathematical Analysis*, 2004. No.11. Pp. 691-705.
5. Mehdi Rahmani, Mahdi Abolhasani. State estimation for stochastic time-varying multisensor systems with multiplicative noises: : Centralized and decentralized data fusion. *Asian Journal of Control*. Vol. 21. Issue 4. Pp. 1547-1555.
6. Ann Spriet, Marc Moonen, Jan Wouters. A multi-channel subband generalized singular value decomposition approach to speech enhancement. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2002. Vol. 13. Issue 2. Pp. 149-158.
7. H. Liu, Z. Wang, C. Zhao, J. Ge, H. Dong and Z. Liu. Improving the Signal-to-Noise-Ratio of Free Induction Decay Signals Using a New Multilinear Singular Value Decomposition-Based Filter. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021. Vol. 70. Pp. 1-11.
8. Eleftherios O. Kontis, Iraklis S. Avgitidis, Theofilos A. Papadopoulos, Georgios A. Barzegkar-Ntovom, Grigoris K. Papagiannis. Multi-channel measurement-based identification methods for mode estimation in power systems. *Electric Power Systems Research*, 2021. Vol. 195.
9. Z. Zhou, L. Xu and B. Liao. Robust Parameter Estimation of Multi-Channel Damped Sinusoids in Impulsive Noise. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024. DOI: 10.1109/TIM.2024.3436103.
10. Pang L., Tang B. A novel method for blind signal separation of single-channel and time-frequency overlapped multi-component signal. *International Journal of Information and Communication Technology*, 2016. Vol. 8. No. 2-3. Pp 123-139.
11. Oropeza V., Sacchi M. Simultaneous seismic data denoising and reconstruction via multichannel singular spectrum analysis. *GEOPHYSICS*, 2011. Vol. 76. Issue 3. DOI:10.1190/1.3552706.
12. M.S. Panahi, Venkat Kr. Blind identification of multi-channel systems with single input and unknown orders. *Signal Processing*, 2009. Vol. 89. Issue 7. Pp. 1288-1310.
13. Jordi Vilà-Valls, Damien Vivet, Eric Chaumette, François Vincent, Pau Closas. Recursive linearly constrained Wiener filter for robust multi-channel signal processing. *Signal Processing*, 2020. Vol. 167. DOI: 10.1016/j.sigpro.2019.107291
14. Changrui L., Chaozhu Zh. Remove Artifacts from a Single-Channel EEG Based on VMD and SOBI. *Sensors*, 2022. Issue 22(17). Pp. 1-19. DOI:10.3390/s22176698.
15. Jean-Michel Papy, Lieven De Lathauwer, Sabine Van Huffel. Common pole estimation in multi-channel exponential data modeling. *Signal Processing*, 2006. Vol. 86. Issue 4. Pp. 846-858.
16. A. Mary Judith, S. Baghavathi Priya, Rakesh Kumar Mahendran. Artifact Removal from EEG signals using Regenerative Multi-Dimensional Singular Value Decomposition and Independent Component Analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, Vol. 74. DOI: 10.1016/j.bspc.2021.103452.
17. Z. Wang, C. M. Wong, A. Rosa, T. Qian and F. Wan. Adaptive Fourier Decomposition for Multi-Channel Signal Analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022. Vol. 70. Pp. 903-918. DOI: 10.1109/TSP.2022.3143723.
18. C. Yu, C. Zhang and L. Xie. Blind Identification of Multi-Channel ARMA Models Based on Second-Order Statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012. Vol. 60. No. 8. Pp. 4415-4420. DOI: 10.1109/TSP.2012.2196698.
19. Pengfei Lv, Xin Wu, Yang Zhao, Jianghao Chang. Noise removal for semi-airborne data using wavelet threshold and singular value decomposition. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, Vol. 201. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104622.
20. Jie Xia , Xinfei Lu and Weidong Chen. Multi-Channel Deconvolution for Forward-Looking Phase Array Radar Imaging. *Remote Sensing*, 2017. Issue 9(7). P. 703. DOI: 10.3390/rs9070703.
21. Jinfeng Huang, Lingli Cui. Tensor Singular Spectrum Decomposition: Multisensor Denoising Algorithm and Application. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023. Vol. 72. Pp. 1-15. DOI: 10.1109/TIM.2023.3249249.
22. Huiming Jiang, Yue Wu, Jing Yuan, Qian Zhao and Jin Chen. Adaptive Low-Rank Tensor Estimation Model Based Multichannel Weak Fault Detection for Bearings. *Sensors*, 2024. Issue 24(12). 3762 p. DOI: 10.3390/s24123762.
23. Bhowmik, Basuraj, et al. Real-time unified single-and multi-channel structural damage detection using recursive singular spectrum analysis. *Structural Health Monitoring*, 2019. Issue 18.2. Pp. 563-589.
24. M. Ge, Y. Lv and Y. Ma. Research on Multichannel Signals Fault Diagnosis for Bearing via Generalized Non-Convex Tensor Robust Principal Component Analysis and Tensor Singular Value Kurtosis. *IEEE Access*, 2020. Vol. 8. Pp. 178425-178449. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3027029.
25. Yong Lv, Bo He, Cancan Yi, Zhang Dang. A novel scheme on multi-channel mechanical fault signal diagnosis based on augmented quaternion singular spectrum analysis. *Journal of Vibroengineering*, 2017. Vol. 19. No. 2. Pp. 955-966. DOI: 10.21595/jve.2016.17239.
26. Yanli Ma, Junsheng Cheng, Ping Wang, Jian Wang, Yu Yang. A novel Lanczos quaternion singular spectrum analysis method and its application to bevel gear fault diagnosis with multi-channel signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, Vol. 168. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108679.
27. Longbiao Wang, Kyohei Odani and Atsuhiko Kai. Dereverberation and denoising based on generalized spectral subtraction by multi-channel LMS algorithm using a small-scale microphone array. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2012. Issue 2012:12.
28. Chen Chen. Research on Single Channel Speech Noise Reduction Algorithm Based on Signal Processing. *5th International Conference on Technologies in Manufacturing, Information and Computing (ICTMIC 2020)*, 2020. Pp. 92-102.
29. Le Trung Thanh, Nguyen Thi Anh Dao, Nguyen Viet Dung, Nguyen Linh Trung and Karim Abed-Meraim. Multi-channel EEG epileptic spike detection by a new method of tensor decomposition. *Journal of Neural Engineering*, 2020. Vol. 17. No. 1. DOI: 10.1088/1741-2552/ab5247
30. Zhenhua Hao, Ziqiang Cui, Shihong Yue, Huaxiang Wang. Singular value decomposition based impulsive noise reduction in multi-frequency phase-sensitive demodulation of electrical impedance tomography. *AIP. Review of Scientific Instruments*, 2018. Vol. 89. Issue 6. DOI: 10.1063/1.5021058.
31. M. R. Amin and R. T. Faghih. Robust Inference of Autonomic Nervous System Activation Using Skin Conductance Measurements: A Multi-Channel Sparse System Identification Approach. *IEEE Access*, 2019. Vol. 7. Pp. 173419-173437. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2956673.

32. Bo Peng, Kaifeng Gong, Zhendong Chen, Chao Chen, Zhan Zhang, Xiaohua Xie, Xihong Chen and Cheng-Chi Tai. Cross-Channel Dynamic Weighting RPCA: A De-Noiseing Algorithm for Multi-Channel Arterial Pulse Signal. *Applied Science*, 2022. Issue 12(6). Pp. 1-19. DOI: 10.3390/app12062931.
33. Bandi, S., Dutt, V.B.S.S.I. Single-channel fetal ECG extraction method based on extended Kalman filtering with singular value decomposition algorithm. *Soft Computing*, 2023. Issue 27. Pp. 9119–9129. DOI: 10.1007/s00500-023-08421-4.
34. Yong Ning, Nicholas Dias, Xuhong Li, Jing Jie, Jinrong Li, Yingchun Zhang. Improve computational efficiency and estimation accuracy of multi-channel surface EMG decomposition via dimensionality reduction. *Computers in Biology and Medicine*, 2019. Vol. 10.1016/j.combiomed.2019.103372.
35. Muñoz-Montoro, A.J., Revuelta-Sanz, P., Martínez-Muñoz, D. et al. An ambient denoising method based on multi-channel non-negative matrix factorization for wheezing detection. *The Journal of Supercomputing*, 2023. Issue 79. Pp. 1571–1591. DOI: 10.1007/s11227-022-04706-x.
36. Yunwei Zhang, Yong Gao. Source number of single-channel signals intelligent estimation via signal reconstruction. *Digital Signal Processing*, 2023. Vol. 140. DOI: 10.1016/j.dsp.2023.104100.
37. Zijian Qiao and Zhengrong Pan. SVD principle analysis and fault diagnosis for bearings based on the correlation coefficient. *Measurement Science and Technology*, 2015. Issue 26. Pp. 1 – 15. DOI:10.1088/0957-0233/26/8/085014.
38. Tadeusz Kaczorek. Angles between matrices and between polynomials in fractional linear systems and electrical circuits. *Computational problems of electrical engineering*, 2020. Vol. 10. No. 1. Pp. 1-10.
39. Greenacre, M., Groenen, P.J.F., Hastie, T. et al. Principal component analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, 2022. Issue 2. 100 p. DOI: 10.1038/s43586-022-00184-w.
40. Sharma, A., Paliwal, K.K. Linear discriminant analysis for the small sample size problem: an overview. *Int. J. Mach. Learn. & Cyber*, 2015. Issue 6. Pp. 443–454 (2015). DOI: 10.1007/s13042-013-0226-9.
41. Balamurali, M. t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding. In: Daya Sagar, B.S., Cheng, Q., McKinley, J., Agterberg, F. (eds) *Encyclopedia of Mathematical Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham*. DOI: 10.1007/978-3-030-85040-1_446.
42. S. B. Kotsiantis. Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. *Informatica*, 2007. Vol. 31. No. 3. Pp. 249-268.

Надійшла (Received) 19.09.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 25.10.2025

Відомості про авторів/About the authors

Полярус Олександр – Доктор технічних наук, професор, професор кафедри Метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, E-mail: poliarus.kharkiv@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8023-5189>

Poliarus Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile & Highway University, E-mail: poliarus.kharkiv@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8023-5189>

Коваль Олександр – Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, E-mail: koval_al@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-2749>

Oleksandr Koval – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile & Highway University, E-mail: koval_al@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-2749>

Медведовська Яна – Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, E-mail: yana.brovko@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9212-6166>

Medvedovska Yana – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile & Highway University, E-mail: yana.brovko@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>

Коваль Андрій – Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, E-mail: koval_andrey79@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>

Koval Andrii – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile & Highway University, E-mail: koval_andrey79@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>

Метод оцінювання шумів в багатоканальній вимірjuвальній інформаційній системі на основі декомпозиції сингулярних значень матриці даних

О.В. Полярус, О.А. Коваль, Я.С. Медведовська, А.О. Коваль

Анотація

Фільтрація шумів широко впроваджена в теорії і техніці обробки сигналів. Значно менша кількість наукових робіт присвячена вилученню шумів з реалізацій випадкових процесів з метою їх аналізу для специфічних завдань. У статті запропоновано метод розділення сигналів і шумів у багатоканальній вимірjuвальній інформаційній системі. Для цього використовується матриця експериментальних даних і за допомогою декомпозиції сингулярних значень (singular value decomposition – SVD) здійснюється аналіз сингулярних мод цієї матриці та парціальних матриць, які є складовими матриці даних. Визначені умови, при яких парціальна матриця першого порядку буде описувати сигнали в каналах системи, а матриці вищих порядків міститимуть шумові компоненти. Для цього косинус кута між матрицею даних та першою парціальною матрицею повинен наближатися до одиниці, а між матрицею даних та другою матрицею – до нуля. Такі умови досягаються у випадках перевищення порогового рівня відношенням сигнал/шум. Отримані шуми в окремих випадках можуть використовуватися для визначення похибок вимірjuвання.

Ключові слова: багатоканальна вимірjuвальна інформаційна система, декомпозиція сингулярних значень, матриця експериментальних даних, фільтрація шуму.

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ТЕРМОМЕТРІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В.О. Кондратенко, О.А. Новосолов

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна,

Анотація

У статті розглянуто процедуру оцінки невизначеності вимірювань під час калібрування термометрів інфрачервоного випромінювання (пірометрів) методом безпосереднього вимірювання температури, використовуючи робочий еталон – випромінювач типу АЧТ. Проведено аналіз найкращих калібрувальних та вимірювальних можливостей акредитованих калібрувальних лабораторій з калібрування пірометрів. Описано методи оцінки джерел невизначеності. Наведено процедуру оцінювання невизначеності вимірювань, яка включає: запис моделі вимірювань, оцінювання вхідних величин та їх стандартні невизначеності, оцінювання розширеної невизначеності. Складено бюджет невизначеності вимірювань.

Ключові слова: невизначеність вимірювань; робочий еталон; єдність вимірювань; методика калібрування; пірометр; метрологічна простежуваність.

1. Вступ

Термометри інфрачервоного випромінювання (пірометри) призначені для безконтактного вимірювання температури поверхні об'єктів. Розвиток термометрії за інфрачервоним випромінюванням спричинив появу на ринку широкого асортименту пірометрів, які зазвичай заявлені виробниками як засоби вимірювання з високою інструментальною точністю, порядку від 0,3 до 1%.

Наявність великої кількості пропозицій від виробників різних країн та цінова доступність пірометрів (у порівнянні з початком 2000-х років), особливо китайських виробників, призвело до збільшення сфер їх використання.

Зокрема в металургійній промисловості в останні роки зросла кількість вимірювальних параметрів де використовуються безконтактні засоби вимірювання температури. Тому є актуальним розроблення нових та удосконалення існуючих методів калібрування пірометрів.

Згідно ДСТУ 3194:2005 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтактні засоби вимірювання температури» [1] при повірці та калібруванні пірометрів використовуються еталонні пірометри. Таким чином, відповідно до статті 1 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [2], пірометри є робочими еталонами та підлягають калібруванню згідно статті 27 [2]. Калібрування робочих еталонів проводиться в порядку, встановленому нормативно-правовим актом центрального органу виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності. Таким нормативно-правовим актом є «Порядок калібрування вторинних та робочих еталонів» [3], затверджений Міністерством економіки України наказом від 10.08.2020

за номером № 1518. Відповідно до [3] калібрування робочих еталонів проводиться:

- науковими метрологічними центрами, які мають міжнародно визнані калібрувальні та вимірювальні можливості за відповідними видами та підвидами вимірювань із застосуванням національних еталонів;
- науковими метрологічними центрами, метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, акредитованими національним органом України з акредитації.

Але, [3] установлює процедуру та умови калібрування тільки робочих еталонів, які використовують під час повірки засобів вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології. Робочі еталони, які використовують під час калібрування ЗВТ, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології, калібруються згідно частині третьої статті 27 [2] відповідно до національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології.

У той же час, за [3] калібрування робочих еталонів проводиться за методиками калібрування, які містяться в національних стандартах або розроблені виконавцями з урахуванням національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології. Таким чином, у [3] допускається проводити калібрування за методиками калібрування, які розроблені виконавцями, про що у [2] мова не йдеться.

Згідно ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» [4], лабораторія може використовувати методи, розроблені або модифіковані

лабораторією, якщо замовник не зазначає метод для використання. Тож, міжнародний стандарт [4], що встановлює вимоги до компетентності калібрувальних лабораторій, дозволяє використовувати методи калібрування, розроблені виконавцями.

Але, [2] має вищу юридичну силу, яка полягає у тому, що всі підзаконні нормативно-правові акти приймаються на його основі та за своїм змістом не повинні суперечити [2]. Для подолання розбіжності між [2] та [3] треба вносити зміни до одного з цих нормативно-правових актів.

Відсутність стандартизованих методик калібрування, що визначають оцінювання невизначеності вимірювань, складання рівняння вимірювань при калібруванні, бюджету невизначеності вимірювань, не відповідає вимогам статті 27 [2], та може привести до порушення єдності вимірювань у метрологічній діяльності, тому, розробка національних стандартів (гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами), які визначатимуть методи калібрування є гарантією забезпечення єдності вимірювань.

Мета статті – розробка процедури оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні термометрів інфрачервоного випромінювання (пірометрів) методом безпосереднього вимірювання температури, використовуючи робочий еталон – випромінювач типу «абсолютне чорне тіло» (далі – АЧТ).

2. Виклад основного матеріалу

2.1. Забезпечення єдності вимірювань у сфері безконтактної термометрії.

Для забезпечення єдності вимірювання температури в області безконтактної термометрії, згідно [1] в Україні створені державні первинні еталони ДЕТУ 06-07-04 та ДЕТУ 06-03-96, що охоплюють діапазон від 692,67 К до 2800 К, які зберігаються у Національному науковому центрі «Інститут метрології» м. Харків.

Діапазони значень відтворюваної одиниці температури та розширені невизначеності ДЕТУ 06-07-04 становлять наступні значення:

- діапазон: від 692,67 К до 1234,93 К;
- невизначеність за типом А (u_A): 0,8 °С;
- невизначеність за типом В (u_B): 0,21 °С;
- сумарна стандартна невизначеність (u_C): 0,83 °С;
- розширена невизначеність (U): 1,65 °С.

Діапазони значень відтворюваної одиниці температури та розширені невизначеності ДЕТУ 06-03-96 становлять наступні значення:

- діапазон: від 1084,62 °С до 2526,85 °С;
- невизначеність за типом А (u_A): 1,9 °С;
- невизначеність за типом В (u_B): 0,37 °С;
- сумарна стандартна невизначеність (u_C): 1,94 °С;
- розширена невизначеність (U): 3,87 °С.

Вимірювальні можливості Національного наукового центру «Інститут метрології» в області безконтактної термометрії опубліковано в базі даних ключових звірень (KCDDB) на сайті Міжнародного бюро з мір і ваг (BIPM).

На цей час, зазначені вимірювальні можливості Національного наукового центру «Інститут метрології» не охоплюють вимірювання температури у діапазоні вимірювань нижче 0 °С.

Таким чином, калібрувальні лабораторії не можуть забезпечити метрологічну простежуваність результатів своїх калібрувань робочих еталонів в області низьких температур в Україні, та вимушені калібрувати робочі еталони за кордоном у організаціях, що мають докази метрологічної простежуваності до Міжнародної системи одиниць SI у діапазоні вимірювань нижче 0 °С. Наразі відсутні національні стандарти з калібрування пірометрів, тому, кожна калібрувальна лабораторія розробляє методики калібрування за своїм розумінням, що не сприяє забезпеченню єдності вимірювань.

Це наочно видно, якщо ознайомитися зі «Сферами акредитації» калібрувальних лабораторій, акредитованих Національним агентством з акредитації України на калібрування пірометрів (таблиця 1).

Аналіз «Сфер акредитації» показує наступне:

1) деякі лабораторії у графі «Устаткування (об'єкт вимірювань)» вказують крім пірометрів інші засоби вимірювання температури, для яких наведені одні й ті самі значення розширеної невизначеності вимірювань, що характеризує калібрувальні та вимірювальні можливості (Calibration and Measurement Capability – СМС) лабораторії; подання такої інформації про СМС не дає змоги замовникам послуг визначити дійсні СМС лабораторії з калібрування пірометрів;

2) усі калібрувальні лабораторії проводять калібрування згідно зі своїми розробленими методами калібрування;

3) деякі калібрувальні лабораторії застосували метод для вираження СМС - діапазон вимірювання. Згідно ІЛАС-Р14:09/2020 «Політика ІЛАС щодо невизначеності вимірювань в калібруванні» [5], у випадку, коли вимірювана величина охоплює значення або ряд значень, та застосовано діапазон вимірювання для вираження СМС, калібрувальна лабораторія повинна забезпечити належну лінійну інтерполяцію, щоб знайти невизначеність при середніх значеннях.

У деяких публікаціях про оцінку невизначеності вимірювань при калібруванні ЗВТ, наприклад у [6], можна виявити, що відома поправка на систематичний ефект не застосована до звітного результату калібрування, а замість цього зроблена спроба використання цього ефекту для збільшення розширеної невизначеності вимірювань.

Автори [6] вважають, якщо кінцевий користувач ЗВТ, не використовує зсув, а оперує значеннями, що показує безпосередньо ЗВТ, без використання адитивної або мультиплікативної поправки, тоді на цій підставі, складову стандартної невизначеності, що «обумовлена зсувом показів ЗВТ» треба вносити до загального бюджету невизначеності, що нібито дозволить використовувати ЗВТ без додаткових обчислень результату вимірювання.

Це хибне твердження може привести до того, що власник пірометра, який буде аналізувати результати калібрування щодо відповідності пірометра технічній специфікації, може прийняти помилкове рішення про його непридатність, враховуючи заявлену збільшену розширену невизначеність.

Тому, власнику пірометрів - замовнику калібрування потрібно обов'язково вказувати у своїй заявці, вимоги щодо необхідності зазначення виконавцем у сертифікаті калібрування висновку про відповідність пірометра технічній специфікації.

Також, з причини відсутності стандартизованих методик калібрування, замовнику калібрування

потрібно вказувати у своїй заявці, вимоги щодо необхідності надання виконавцем модельного рівняння та бюджету невизначеності вимірювань, за якими виконувалось калібрування еталонного пірометра або еталонного випромінювача типу АЧТ.

Це необхідно замовнику калібрування для правильного складання власного бюджету невизначеності під час калібрування робочих пірометрів і для врахування усіх можливих поправок, що стосуються еталонного пірометра або АЧТ, чи навпаки виключення цих поправок із власного бюджету, якщо вони вже були враховані виконавцем калібрування.

Таблиця 1 – Виписка зі «Сфер акредитацій» калібрувальних лабораторій з калібрування пірометрів

№	Найменування КЛ	Устаткування (об'єкт вимірювань)	Діапазон або точка вимірювань, у яких проводиться калібрування	Розширена невизначеність вимірювань $U(k=2)$	Позначання нормативних документів на методи калібрування та метод (принцип) вимірювання
1	ДП «Укрметртест-стандарт»	Пірометри, тепловізори	(мінус 30 – 150) °C (260 – 1000) °C	(0,75 – 2) °C (3 – 20) °C	МКУ 520-24/06 Прямі вимірювання
2	ДП «Дніпро-стандартметрологія»	Пірометри інфрачервоного випромінювання та тепловізори	(мінус 30 – 500) °C	(0,6 – 3,0) °C	МК Д 15/62-2021 Прямі вимірювання Зв'язані з еталоном
3	ДП «Харків-стандартметрологія»	Пірометри інфрачервоного випромінювання, тепловізори	мінус 30 – 100 °C > 100 – 200 °C > 200 – 300 °C > 300 – 400 °C > 400 – 500 °C > 500 – 600 °C > 600 – 700 °C > 700 – 800 °C > 800 – 900 °C > 900 – 1000 °C > 1000 – 1100 °C > 1100 – 1200 °C > 1200 – 1700 °C	0,7 °C 1,1 °C 1,6 °C 2,1 °C 2,5 °C 3,0 °C 3,5 °C 4,0 °C 4,6 °C 5,2 °C 5,7 °C 6,3 °C 8,8 °C	СОУ РУ 74.3-04725906-0092:2013; СОУ РУ 74.3-04725906-0085:2013
4	Криворізька філія ДП «Дніпро-стандартметрологія»	Пірометри інфрачервоні, медичні та тепловізори	(мінус 10 – 300) °C (32 – 43) °C	(0,30 – 0,31) °C 0,13 °C	МК-06/05 Прямі вимірювання
5	Черкаська філія ДП «Полтава-стандартметрологія»	Термометри безконтактні	мінус 10 – 100 °C	0,61 °C	МК 06-06-09
6	ПП «Науково-виробничий центр оцінки відповідності «ЮГ»	Пірометри	(30 – 600) °C	(0,6 – 2,0) °C	МК-19
7	ТОВ «РІВНЕ-СТАНДАРТ»	Термометри безконтактні, пірометри інфрачервоні, тепловізори, термометри безконтактні медичні	мінус 20 - 15 °C 15 - 30 °C 30 - 300 °C	0,1 °C 0,12 °C 0,14 °C	МК-Т-04-2021
8	ТОВ «ТЕСТМЕТР-СТАНДАРТ»	Термометри інфрачервоні, термометри безконтактні	Від мінус 50 °C до 60 °C Від 60 °C до 1500 °C	Від 0,5 °C до 1,65 °C Від 0,5 °C до 1,65 °C	МК 06-01 від 20.03.2023 Безпосереднє зв'язання

2.2 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні пірометрів методом безпосереднього вимірювання температури, використовуючи робочий еталон – випромінювач типу АЧТ.

Калібрування пірометрів методом безпосереднього вимірювання проводиться відповідно до схеми, наведеною на рис. 1.

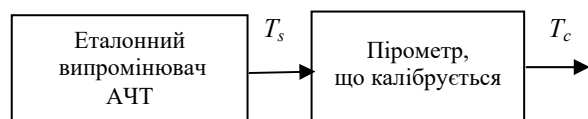


Рис. 1 – Схема калібрування пірометра

Складання модельного рівняння калібрування пірометра.

Відхилення показів пірометра, що калібрується T_x складається з:

$$T_x = (T_c + \delta_c + \delta_f) - (T_s + \delta_s + \delta_{dr} + \delta_{bb}), \quad (1)$$

де: T_c – температура виміряна пірометром, що калібрується; δ_c – поправка, що враховує роздільну здатність пірометра, що калібрується; δ_f – поправка, що враховує вплив оптичної роздільної здатності пірометра, що калібрується; T_s – температура задана еталонним випромінювачем типу АЧТ; δ_s – поправка, що враховує точність еталонного випромінювача типу АЧТ із сертифіката калібрування; δ_{dr} – поправка на дрейф еталонного випромінювача типу АЧТ з часу його попереднього калібрування; δ_{bb} – поправка, що враховує температурну стабільність еталонного випромінювача типу АЧТ.

Оцінювання вхідних величин.

Оцінкою температури, виміряної пірометром, що калібрується, є середнє арифметичне його n_c показань \bar{T}_c , °С:

$$\bar{T}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ci}. \quad (2)$$

Оцінювання стандартних невизначеностей вхідних величин.

Стандартна невизначеність за типом A , пов'язана з розсіянням показань пірометра, що калібрується, обумовлена джерелами невизначеності, що мають випадковий характер, визначається за формулою:

$$u_A(\bar{T}_c) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (T_{ci} - \bar{T}_c)^2}. \quad (3)$$

Стандартна невизначеність за типом B , обумовлена джерелами, які мають системний характер, визначається за формулою:

$$u_B = \sqrt{u_B^2(\delta_c) + u_B^2(\delta_s) + u_B^2(\delta_{dr}) + u_B^2(\delta_{bb}) + u_B^2(\delta_f)}. \quad (4)$$

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовлена роздільною здатністю пірометра, що калібрується, характеризується прямокутним розподілом і розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_c) = \frac{b}{2\sqrt{3}}, \quad (5)$$

де b – роздільна здатність пірометра, що калібрується.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, що враховує точність випромінювача типу АЧТ розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_s) = \frac{U_s}{k_s}, \quad (6)$$

де: U_s – розширена невизначеність випромінювача типу АЧТ, взята з сертифіката про калібрування для

точки калібрування пірометра, що калібрується (якщо значення U_s для точки калібрування безпосередньо не зазначено у сертифікаті, його визначають шляхом лінійної інтерполяції між двома відомими сусідніми значеннями невизначеності для відповідного діапазону вимірювань випромінювача типу АЧТ); k_s – коефіцієнт покриття, взятий із сертифіката калібрування випромінювача типу АЧТ.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовленої дрейфом випромінювача типу АЧТ, характеризується прямокутним розподілом та розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_{dr}) = \frac{\Theta_{dr}}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

де Θ_{dr} – поправка, обумовлена зміною значення робочого еталону з моменту його останнього калібрування із-за дрейфу:

$$\Theta_{dr} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) \frac{t_2}{t_1}; \quad (8)$$

ΔT_2 – відхилення показів еталона з діючого сертифікату калібрування; ΔT_1 – відхилення показів еталона з попереднього сертифікату калібрування; t_1 – час між калібруваннями; t_2 – час від останнього калібрування до поточної дати.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовленої температурною стабільністю еталонного випромінювача типу АЧТ, характеризується прямокутним розподілом та розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_{bb}) = \frac{S_{bb}}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

де S_{bb} – температурна стабільність еталонного випромінювача типу АЧТ з технічної специфікації.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовленої впливом оптичної роздільної здатності пірометра розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_f) = \frac{\bar{T}_{d_{\max}} - \bar{T}_{d_{\min}}}{\sqrt{3}}, \quad (10)$$

де: $\bar{T}_{d_{\max}}$ – середнє арифметичне значення десяти вимірювань температури при максимальному діаметрі діафрагми; $\bar{T}_{d_{\min}}$ – середнє арифметичне значення десяти вимірювань температури при мінімальному діаметрі діафрагми.

Метод визначення поправки, обумовленої впливом оптичної роздільної здатності пірометра.

В площину пірометра, перед апертурою АЧТ, встановлюється діафрагма з круглим отвором змінного діаметру, центр якого збігається з оптичною віссю. Відстань від діафрагми до переднього краю пірометра повинна забезпечувати мінімальний розмір поля зору пірометра (точка фокуса) який розраховується згідно встановленого виробником показника візування (зазначається в інструкції з експлуатації). На діафрагмі виставляється максимальний

діаметр, який дорівнює (або більше) діаметру апертури АЧТ та виконуються десять вимірювань температури $\bar{T}_{d_{max}}$. Потім на діафрагмі виставляється мінімальний діаметр, який дорівнює мінімальному діаметру поля зору пірметра у точці його фокуса та виконуються десять вимірювань температури $\bar{T}_{d_{min}}$.

Обчислення сумарної стандартної невизначеності.

Оскільки модель вимірювань носить лінійний характер, а вклади всіх вхідних величин не корелюють один з одним, сумарна невизначеність вимірюваної при калібруванні пірметра розраховується за формулою:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (11)$$

Оцінювання розширеної невизначеності вимірювань.

Розширена невизначеність вимірювань для кожної точки калібрування визначається як:

$$U = k \cdot u_c \quad (12)$$

де k – коефіцієнт покриття.

У випадках, коли нормальний (гаусівський) розподіл можна віднести до вимірюваної величини і стандартна невизначеність, пов'язана з оцінкою вихідної величини, є достатньо надійною, використовують стандартний коефіцієнт покриття $k = 2$, що відповідає ймовірності охоплення приблизно 95%.

Ці умови виконуються в більшості випадків, які зустрічаються під час калібрування.

Бюджет невизначеності вимірювань для розглянутої процедури наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Бюджет невизначеності вимірювань при калібруванні пірметра

Вхідна величина	Значення вхідної величини	Стандартні невизначеності вхідних величин	Коефіцієнти чутливості	Вклади невизначеності, °C
T_c	\bar{T}_c	$u_A(\bar{T}_c)$	1	(3)
δ_C	0	$u_B(\delta_C)$	1	(5)
δ_S	U_S	$u_B(\delta_S)$	- 1	(6)
δ_{dr}	0	$u_B(\delta_{dr})$	- 1	(7)
δ_{bb}	0	$u_B(\delta_{bb})$	- 1	(9)
δ_f	0	$u_B(\delta_f)$	1	(10)
Вихідна величина	Оцінка результату вимірювання, °C	Стандартна сумарна невизначеність, °C	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність, °C
T_X	(2)	(11)	k	(12)

3. Висновки

1. Описано аналіз та методи оцінки можливих джерел невизначеності при калібруванні термометрів інфрачервоного випромінювання.

2. Наведено процедуру оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні термометрів

інфрачервоного випромінювання методом звіряння з випромінювачем типу АЧТ.

3. Складено бюджет невизначеності вимірювань калібрування термометрів інфрачервоного випромінювання методом звіряння з випромінювачем типу АЧТ.

Список літератури

1. ДСТУ 3194:2005 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтактні засоби вимірювання температури».
2. Закон України від 05.06.2014 № 1314–VII «Про метрологію та метрологічну діяльність».
3. Наказ Мінекономіки України від 10.08.2020 № 1518 «Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів».
4. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій».
5. ILAC-P14:09/2020 «Політика ILAC щодо невизначеності вимірювань в калібруванні».
6. Kolobrodov V., Sokol B. Development of a polarimetric thermal imager calibration method. *Measurements infrastructure*. 2024, vol. 4 MI_38_080633.

Надійшла (Received) 06.08.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 16.09.2025

Measurement uncertainty evaluation at infrared thermometers calibration

Abstract

The article considers the procedure for measurement uncertainty evaluation at calibration of infrared thermometers (pyrometers) by direct temperature measurement using a working standard – blackbody type emitter. An analysis of the best calibration

and measurement capabilities of accredited calibration laboratories for pyrometer calibration is carried out. Methods for estimating uncertainty sources are described. A procedure for estimating measurement uncertainty is presented, which includes: recording the measurement model, estimating input quantities and their standard uncertainties, estimating expanded uncertainty. A measurement uncertainty budget is compiled.

Key words: measurement uncertainty; working standard; ensuring the unity of measurements; calibration method; pyrometer; metrological traceability.

Відомості про авторів / About the authors

Кондратенко Вадим – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: vakond@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3833-1467>

Kondratenko Vadym – post-graduate student of the Department of Information and Measurement Technology of the Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: vakond@ukr.net, Number ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3833-1467>

Новосьолов Олег – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: oanovoselov@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

Novoselov Oleg – post-graduate student of the Department of Information and Measurement Technology of the Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: oanovoselov@ukr.net, Number ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

A STUDY OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MULTISENSOR SYSTEMS FOR MEASURING EXTERNAL MAGNETIC FIELDS

O.V. Degtiarov¹, I.I. Klyuchnyk¹, I.E. Khoroshailo¹, V.O. Lutsenko¹.

¹ *Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail:oleksandr.degtiarov@nure.ua*

Abstract

The paper investigates the metrological characteristics of instruments for spatial harmonic analysis of external magnetic fields generated by technical objects. Mathematical models of signal conversion are presented, along with relations for calculating the conversion function, sensitivity, linear-angular, and multipole measurement errors. The influence of the spatial configuration of the distributed converter system on measurement accuracy and interference immunity is analyzed. The obtained dependencies can be used to evaluate accuracy and optimize the parameters of spatial harmonic analysis instruments.

Keywords: external magnetic field; spatial harmonic analysis; metrological characteristics; distributed converter system; conversion function; sensitivity; measurement error; interference immunity.

1. Introduction

Measurement of parameters of external magnetic fields of technical objects is an important direction of modern metrology, since magnetic fields accompany the operation of most electrical, energy and transport systems. Their control allows to assess electromagnetic compatibility, equipment condition and impact on the environment. The increase in the density of electronic devices, the use of powerful power supplies and automation systems leads to the need for high-precision methods of spatial analysis of magnetic fields. This determines the relevance of creating measuring instruments with improved metrological characteristics, capable of selectively determining the parameters of individual spatial harmonics.

The application of multipole field theory [1,6,7] to the study of external magnetic fields generated by technical objects in the surrounding space – according to which the source field represents a spatial spectrum of individual harmonics or multipoles – has led to the creation of new magnetometric methods and measuring instruments designed for the selective measurement of spatial harmonic parameters. It is the provision of spatial filtering capability, i.e., the isolation of any individual component from the entire multipole spectrum and the determination of its parameters, that allows these measurement tools to be classified into a separate group and defined as tools for spatial harmonic analysis. The issues of assessing and improving the accuracy of measurement data are urgent, which requires the study of metrological characteristics. This issue is a narrow field of measurement and is not sufficiently covered in publications.

A review of recent publications shows that considerable attention is given to improving the accuracy of magnetic parameter measurements for technical objects, particularly small satellites and elements of electrical

equipment. In study [1], a methodological error of 2% and a total stand error of 13% were achieved, confirming the complexity of ensuring high accuracy when reproducing magnetic moments. In [2], the measurement errors of magnetic parameters of satellite components were analyzed, but the methodological error and its estimation procedure were not specified. The authors of [3, 4] proposed measurement techniques limited by the geometry of the objects under test - coil-type or disk-shaped. Paper [5] focuses on the methodology for evaluating the uncertainties of magnetic moment measurements, confirming the need to improve metrological support in this area. Therefore, the comprehensive analysis of metrological characteristics of spatial harmonic analysis instruments remains an insufficiently studied research direction.

The purpose of the study is to determine and analyze the metrological characteristics of instruments for spatial harmonic analysis of external magnetic fields generated by technical objects, as well as to develop mathematical models describing their conversion function, sensitivity, measurement errors, and interference immunity.

To achieve this purpose, the following objectives were set:

- 1) To develop mathematical models of transformations for distributed converter systems used in spatial harmonic analysis instruments.
- 2) To determine the main metrological characteristics, including the conversion function, sensitivity, multipole, and linear-angular errors.
- 3) To assess the influence of the spatial configuration of converter systems on measurement results and interference immunity.
- 4) To generalize the obtained results for further optimization of the design and parameters of spatial harmonic analysis instruments.

2. Research results

The main magnetic parameters of multipoles, which determine the spatial image inherent only to a given object and generally constitute its information field, include, firstly, multipole magnetic moments, which are considered as sources of the corresponding spatial harmonics, and, secondly, the level and distribution of the intensity of the total magnetic field of the source and each of the multipoles that make it up.

To analyze constant and low-frequency magnetic fields, under condition $\text{rot}\vec{H} = 0$, the mathematical apparatus of multipole field theory can be applied in the form of spatial series, which for the components of the tension in the spherical coordinate system R, φ, θ have the form (1-3):

$$H_R = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\cos\theta), \quad (1)$$

$$H_\varphi = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \sin m\varphi - h_{nm} \cos m\varphi) \frac{m P_n^m(\theta)}{\sin\theta}, \quad (2)$$

$$H_\theta = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) \frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial\theta}, \quad (3)$$

where g_{nm} , h_{nm} are multipole magnetic moments, $A \cdot m^{n+1}$; n is the multipole order or harmonic number, m is the elementary multipole of the n^{th} order; $P_n^m(\cos\theta)$ is the adjoint Legendre polynomials.

The solution of the spatial filtering problem became possible through the application of the principle of spatial arrangement of sensors, when a certain number of sensors are simultaneously placed at the control points around the source of an external magnetic field (EMF), which are electrically combined into a system. Such a system of transducers with a certain spatial configuration is a functionally complete technical means – a distributed transducer system (DTS). Since it is the DTS that provides the necessary functional conversion of magnetic parameters into an electrical signal, its metrological characteristics (MCh) determine the properties of a particular means of spatial harmonic analysis (SHA) as a whole.

Research in this direction has revealed that the characteristic intended for determining the measurement results – the conversion function, as well as the characteristics of the errors of the tool are entirely determined by the structure of the DTS and the switching algorithms of the system's converters. Therefore, further, using the example of analyzing a DTS consisting of eight sensors located in the equatorial plane around the studied EMF source evenly on two circles, the axes of which coincide and the radii R differ, we will determine such basic MCh of this SHA tool as the conversion function, sensitivity to the measured magnetic parameters, noise immunity, multipole and linear-angular errors.

Expressions (1-3) are initial for obtaining mathematical models of DTS, creation of new DTS tools and obtaining metrological characteristics noted above.

The eight-point DTS under consideration excludes the influence on the measurement result of all paired

multipoles of the spectrum (1-3), as well as the third and some components of the fifth-order multipole and provides measurement of the parameters of the first spatial harmonic – dipole magnetic moments.

The three-component DTS sensors are divided into two bodies of four in each so that sensors 1-4 are located on a circle with radius R , sensors 5-8 on a circle with radius $R_1 > R$. The distances R and R_1 are related to the sensitivity S to the magnetic field strength of sensors 1-4 and the sensitivity S_1 of sensors 5-8 by the ratio

$$\frac{R_1}{R} = \left(\frac{S_1}{S} \right)^{1/5}. \quad (4)$$

To obtain the conversion function, we give an expression for the useful signal E_x at the output of channel X of the eight-point DTS, which represents a mathematical model of the conversion:

$$E_x = S_x (H_1 + H_2 - H_3 - H_4) - S_{1x} (H_5 + H_6 - H_7 - H_8) = S_x (H_{R(R, \varphi=0^\circ)} + H_{\varphi(R, \varphi=90^\circ)} - H_{R(R, \varphi=180^\circ)} - H_{\varphi(R, \varphi=270^\circ)}) - S_{1x} (H_{R_1(R_1, \varphi=0^\circ)} + H_{\varphi(R_1, \varphi=90^\circ)} - H_{R_1(R_1, \varphi=180^\circ)} - H_{\varphi(R_1, \varphi=270^\circ)}),$$

where S_x , mV/mOe is sensitivity of sensors 1-4, S_{1x} is sensitivity of sensors 5-8 of measuring channel X.

Summing up the radial and tangential components of the EMF intensity determined at the control points using this algorithm, under condition (4) and without taking into account the insignificant fraction of non-excluded multipoles of higher odd orders ($n=5, 7, \dots$), leads to the following result:

$$E_x = 6g_{11} \frac{S_x}{R^3} (1 - k_s^{5/2}), \quad (5)$$

where $k_s = S_1/S$.

The coefficient g_{11} is in this expression is a constant value for a given EMF source and is equal to the dipole moment M_x . The value of the electrical signal at the output of channel X (5) determines the dipole moment M_x ,

$$M_x = E_x = \frac{1}{(1 - k_s^{5/2})} \cdot \frac{R^3}{6S_x}. \quad (6)$$

Then, based on the obtained expressions for E_x and M_x , for channel X, we can conclude that expression (5) is the eight-point DTS transformation function, and expression (6) is the working measurement formula implemented by the SHA tool as a whole.

From expression (6) the sensitivity S_M^x of channel X to the dipole magnetic moment M_x is determined, which depends on the sensitivity of DTS converters:

$$S_M^x = 6S_x (1 - k_s^{2/5}),$$

Thus, the conversion function and channel sensitivity can be represented as dependencies:

$$M_x = f(R, E_x); S_M^x = f(S_x, S_{1x}).$$

The above dependencies also fully apply to channels Y, Z of the eight-point DTS. The considered characteristics are the same for channels X and Y, differ for channel Z, but have the same structure.

The use of SHA tools is associated with the procedure of placing transducers at control points in space with specified coordinates, which, according to the type of DTS, depend on the selected measurement method.

Due to the fact that the SHA means transformation function in the form (6), where $E_x = S_x \cdot H(R, \varphi)$, is essentially a mathematical model for solving the inverse magnetostatics problem regarding the determination of the moment M_x , the field source, which by formulation belongs to the class of incorrect ones, the question arises about the stability of its solution, that is, whether small perturbations in the magnetic field strength, which arise due to inaccurate placement of sensors, correspond to small deviations of the solution of the problem regarding the magnetic moment.

Research in this direction has shown that the problem is stable and errors in installing sensors at points with given coordinates $\pm \Delta R, \pm \Delta \varphi, \pm \Delta \theta$ lead to the appearance of a random linear-angular error. For the eight-point SHA tool, this error depends on the values of the distances R and R_l to the EMF source, at which the sensors are installed, and on the magnitudes of the displacements of each of the spherical coordinates of the sensor installation points, which are respectively given by the boundaries $\pm \Delta R, \pm \Delta \varphi, \pm \Delta \theta$.

When finding the limits of the linear-angular error, its root-mean-square value in relative form for the measuring instrument under consideration, assuming a uniform law of deviation distribution, $\pm \Delta R, \pm \Delta \varphi, \pm \Delta \theta$ will be determined by the following formula:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 \Delta E_{ix}^2}{1,73 \cdot E_{ix}}}, \quad (7)$$

where ΔE_{ix} is the absolute error of measurement of the useful electrical signal by the i^{th} sensor of channel X; E_{ix} is the effective value of the useful electrical signal, which is given in the i^{th} sensor of channel X, determined by formula (5).

The X and Y channels of this device are identical, so we will now focus on determining the limits of the linear-angular error of the inaccuracy of the sensor installation for the SHA device under consideration only when measuring the moment M_x .

When measuring the moment M_x with this device, the sensors of the X channel, the direction of the magnetic axes of which coincide with or are parallel to the X coordinate axis, will be affected by the radial H_{1R} (1) and tangential $H_{1\varphi}$ (2) components of the dipole component of the magnetic field strength.

Due to the fact that it is planned to use SHA tools to measure the EMF of electrical equipment that has different

overall dimensions and is in different operating conditions, i.e. $R = \text{var}$, there is a practical need for an equation that will allow for a priori calculation of the standard deviation of the desired error at permissible deviation values $\pm \Delta R, \pm \Delta \varphi, \pm \Delta \theta$ for different values of the control distance R . Thus, such an equation, which is an important MCh, would be convenient to present in the form of a functional dependence $\sigma_0 = f(\Delta R / R, \Delta \alpha)$ with its subsequent generalization to other multipoint SHA means. Deviations $\Delta \varphi, \Delta \theta$ as quantities of one order of magnitude, within which the angular coordinates of the sensor installation point can be located with equal probability, are denoted as $\Delta \alpha$, i.e. $\Delta \alpha = \Delta \varphi = \Delta \theta$.

To simplify further calculations, let us consider a real case for a certain DTS configuration, when $k_s = 2$. In this case, the distances at which the sensors are located are related as $R_l = 1,15 \cdot R$. Then, under the specified conditions and the corresponding transformations of expression (7), after substituting the components of the intensity of the first spatial harmonic from the series (1), (2) and taking into account the deviations $\pm \Delta R, \pm \Delta \varphi, \pm \Delta \theta$, we obtain:

$$\sigma_0 = 0,43 \left\{ \frac{4[-\sin^2 \Delta \alpha \pm 3(\Delta R / R)]^2}{[1 \pm 3(\Delta R / R)]^2} + \frac{[-\sin^2(\Delta \alpha / 2) \pm 3(\Delta R / R)]^2}{[1 \pm 3(\Delta R / R)]^2} + \frac{7[-\sin^2 \Delta \alpha \pm 2,61(\Delta R / R)]^2}{[1 \pm 3(\Delta R / R)]^2} + \frac{1,74[-2\sin^2(\Delta \alpha / 2) \pm 2,61(\Delta R / R)]^2}{[1 \pm 3(\Delta R / R)]^2} \right\}^{1/2}.$$

It was noted above that the eight-point DTS according to the given transformation model (5) provides measurement of the parameters of the first spatial harmonic with an error caused by the non-excluded elementary harmonics of the fifth order multipole. This error is defined as multipole and is the error of the measurement method implemented by the eight-point DTS.

The noted methodological multipole measurement error M_x, M_y, M_z in relative form is equal to

$$\delta_x = \frac{E_{x5}}{E_{x1}} 100\% = -\frac{40}{g_{11} R^4} \left(\frac{1}{12} g_{51} - g_{53} + 66 g_{55} \right) \cdot 100\%;$$

$$\delta_y = \frac{E_{y5}}{E_{y1}} 100\% = -\frac{40}{h_{11} R^4} \left(\frac{1}{12} h_{51} - h_{53} + 66 h_{55} \right) \cdot 100\%;$$

$$\delta_z = \frac{E_{z5}}{E_{z1}} 100\% = -\frac{1,43}{g_{10} R^4} g_{50} \cdot 100\%.$$

where g_{5m}, h_{5m} ($m = 0, 1, 3, 5$) are the fifth harmonic magnetic moments caused by the displacement of the magnetic dipole to coordinates x_0, y_0, z_0 .

After substituting the values g_{5m}, h_{5m} associated with the overall dimensions of the investigated EMF source, which is largely convenient from the point of view of

practical evaluation, for the limiting value of the methodological error of measuring dipole moments, we can write:

$$\begin{aligned}\delta_x &= -0.62\left(\frac{L_x}{R}\right)^4 \cdot 100\%; \\ \delta_y &= -0.62\left(\frac{L_y}{R}\right)^4 \cdot 100\%; \\ \delta_z &= -0.44\left(\frac{L_z}{R}\right)^4 \cdot 100\%;\end{aligned}$$

where L_x, L_y, L_z are the overall dimensions of the EMF source in the coordinate directions X, Y, Z of the adopted coordinate system, respectively.

The use of distributed systems of transducers with different sensor configurations in space as part of SHA tools allows for quite flexible coverage of EMF sources with different geometries, and, in addition, provides the opportunity to perform research under operating conditions of the sources.

In such a formulation, the solution of the problem of spatial selection of parameters of individual multipoles is directly correlated with the problem of ensuring the reliability of measurements under the influence of magnetic interference fields created by extraneous sources. The property of SHA means with DTS of a particular configuration, which characterizes the degree of influence of interference fields on the results of spatial measurements, is determined by such an important MCh as interference immunity. Through this MCh, the additive component of the error due to the action of magnetic interference fields can also be determined.

The interference immunity of an eight-point system and in general of any DTS consisting of a total number of transducers n , which are located around the investigated source of the MMF, is defined as the deviation of the resulting interference signal

$$E_{I\tau} = S_\tau \sum_{i=1}^n H_{iI\tau},$$

where $H_{iI\tau}$ is the magnetic field strength of the interference, which affects the magnetic axes of the transducers of the corresponding channel) at the channel $\tau = X, Y, Z$ output from the basic interference signal

$E_{I\tau 0} = S_\tau H_{I\tau 0}$, which is proportional to the interference strength $H_{3\tau 0}$ in the center of the DTS:

$$\Delta_{I\tau}^n = \frac{E_{I\tau 0} - E_{I\tau}}{E_{I\tau}} 100\%. \quad (8)$$

Given the dipole nature of the interference magnetic field, we will determine the interference immunity of the eight-point DTS for channel X. Let us assume that the dipole magnetic moment of the external interference $M_{DI} = M_{DIx}$ is located on the X axis and is distant R_C from the geometric center SHZ and oriented in the direction of the component M_x . Then the magnetic potential of the interference dipole will be equal to

$$U = \frac{\bar{M}_{DI}\bar{R}}{4\pi R^3}, \quad (9)$$

where $\bar{R} = \bar{i}x + \bar{j}k + \bar{k}z$; x, y, z are current coordinates of the observation point.

To determine the noise immunity Δ_{Ix}^8 of an eight-point DTS, it will be convenient to expand the potential (9) in the Cartesian coordinate system:

$$U = \frac{M_{DIx}x + M_{DIy}y + M_{DIz}z}{4\pi R^3}. \quad (10)$$

Based on (10) and taking into account the connection $H_x = -\partial U / \partial x$, the x-component of the magnetic field strength of the interference H_{Ix} , which affects the magnetic axes of the converters of channel X, is found:

$$H_{Ix} = H_{Ix0} \frac{R_C^3(2x^2 - y^2)}{2(x^2 - y^2)^{5/2}},$$

where $H_{Ix0} = M_{DIx} / 2\pi R_C^3$ is the magnetic field strength of the interference in the centre of the SHA, the level of which is taken as the baseline.

The coordinates of points 1-8 of the sensor location in the form $i(x_i, y_i)$ are equal to

$$\begin{aligned}1(R_C + R, 0); 2(R_C + R); 3(R_C - R, 0); 4(R_C - R); \\ 5(R_C + R, 0); 6(R_C + R); 7(R_C - R, 0); 8(R_C - R).\end{aligned}$$

After performing the summation according to the DTS transformation model of the components in the form $S_X H_{iIx}$, where $S_X = S_x, S_{ix}$; i is the sensor number, which is proportional to the interference signal in each of the converters, we obtain E_{Ix} , based on (8), we find Δ_{Ix}^8 :

$$\Delta_{Ix}^8 = \left\{ 1 - \lambda^3 \left[\frac{4\lambda(3,96 + \lambda^2)}{(\lambda^2 - 1,32)^3} + \frac{2,64 - 4\lambda^2}{(\lambda^2 + 1,32)^{5/2}} - \frac{2\lambda(3 + \lambda^2)}{(\lambda^2 - 1)^3} + \frac{1 - 2\lambda^2}{(\lambda^2 + 1)^{5/2}} \right] \right\},$$

Note that the interference immunity of the channels X and Y of the DTS under consideration is the same and, given the relative remoteness of the interference source $\lambda = R_C/R \geq 10$, the interference immunity of the channels exceeds 90 %.

Provided that the dipole moments of the investigated EMF M_x source and the sources of the interference field M_{DIx} are known, the error due to the action of the magnetic fields of interference from external sources can be determined:

$$\delta_{Ix} = \frac{0,52M_{DIx}}{M_x e^3} (1 - \Delta_{Ix}^8) \cdot 100, \%$$

3 Conclusions

1) The main metrological characteristics of instruments for spatial harmonic analysis of external magnetic fields have been determined, taking into account the specifics of spatial filtering when measuring the parameters of individual harmonics.

2) It has been shown that the conversion function of spatial harmonic analysis instruments is entirely

determined by the configuration of the distributed converter system and the applied switching algorithms.

3) Relationships for calculating sensitivity, multipole, linear-angular, and interference errors have been obtained, enabling a quantitative assessment of measurement accuracy.

4) It has been established that changes in the geometry of sensor placement significantly affect

metrological characteristics and can be used to optimize the design of spatial harmonic analysis instruments.

5) The obtained results provide a foundation for improving the metrological support of magnetic field measurements of technical objects under complex operating conditions.

References

1. Yanovsky B.M. (1978). Terrestrial Magnetism. LSUniversity, 592 p.
2. Armano M. et al. Precision measurements of the magnetic parameters of LISA Pathfinder test masses // Instrumentation and Methods for Astrophysics, 2024, v2. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.04431>
3. Moschitta A. et al. Accurate Estimation of a Coil Magnetic Dipole Moment // IEEE International Workshop on Measurement and Networking (M&N), Naples, 2017. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.07054>
4. Amrani D. Determination of Magnetic Dipole Moment of Permanent Disc Magnet with Two Different Methods // Physics Education, 2015, vol. 31, no. 1, pp. 1–6.
5. Govind B., Misra D.K., Khanna S.P., Kumar A., Bano S. Errors in Measurement of Magnetic Field and Magnetic Moment with its Associated Uncertainty. Recent Advances in Metrology // Lecture Notes in Electrical Engineering, 2023, vol.906, pp. 157–165. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2468-2_18
6. Lupikov V.S. Theoretical substantiation of the combined dipole model of the external magnetic field of electrical equipment // Bulletin of the National University "KhPI", 2001, vol. 17, pp. 95–102.
7. Lupikov V.S. et al. Magnetic moment as a function of parameters of the magnetic field source of various types of electrical equipment // Bulletin of the National University "KhPI", 2008, no. 25, pp. 67–80.

Надійшла(Received) 10.09.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 13.10.2025

ABOUT THE AUTHORS/ ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Дегтярьов Олександр Валентинович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: oleksandr.degtyarov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3187-1621>.

Oleksandr Degtyarov – PhD, associate professor of Information and Measurement Technology Department of Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.degtyarov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3187-1621>.

Ключник Ігор Іванович – професор кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, кандидат технічних наук, доцент, професор університету, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: igor.kliuchnyk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9352-5716>.

Klyuchnyk Igor Ivanovych – professor of the Department of Electronic Devices Design and Operation, PhD, associate professor, professor of the University, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: igor.kliuchnyk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9352-5716>.

Хорошайло Юрій Євгенович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: yurii.khoroshailo@nure.ua, ORCID:0000-0002-4239-4357.

Iurii Khoroshailo – PhD, associate professor, Head of Design and Operation of Electronic Devices Department of Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: yurii.khoroshailo@nure.ua.

Lutsenko Viktor – PhD student of IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: viktor.lutsenko@nure.ua, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0491-3280>.

Луценко Віктор Олександрович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: viktor.lutsenko@nure.ua, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0491-3280>.

Дослідження метрологічних характеристик мультисенсорних систем для вимірювання зовнішніх магнітних полів
О.В. Дегтярьов, І.І. Ключник, Ю.Є.Хорошайло, В.О. Луценко

Анотація:

У статті досліджено метрологічні характеристики приладів для просторового гармонічного аналізу зовнішніх магнітних полів, що генеруються технічними об'єктами. Представлено математичні моделі перетворення сигналів, а також співвідношення для розрахунку функції перетворення, чутливості, лінійно-кутової та мультипольної похибок вимірювання. Проаналізовано вплив просторової конфігурації розподіленої перетворювальної системи на точність вимірювання та завадостійкість. Отримані залежності можуть бути використані для оцінки точності та оптимізації параметрів приладів просторового гармонічного аналізу.

Ключові слова: зовнішнє магнітне поле; просторовий гармонічний аналіз; метрологічні характеристики; розподілена система перетворювачів; функція перетворення; чутливість; похибка вимірювання; завадостійкість.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ

М.Д. Кошовий¹, О.М. Костенко², Г.В. Павлик¹, Т.Г. Рожнова³, Т.В. Чебикіна¹

¹ Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, kafedraapi@ukr.net

² Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, kostenko@pdau.edu.ua

³ Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, tetiana.rozhnova@nure.ua

Анотація

Актуальність. При розробці волоконно-оптичних датчиків температури та вологості актуальними є задачі запобігання взаємного впливу вимірюваних параметрів на результати вимірювання, розширення функціональних можливостей датчиків та підвищення їх технологічності. Мета. Розробка нових волоконно-оптичних датчиків температури та вологості. Методи дослідження. Методи аналізу та синтезу, схемотехніки. Результати та висновки. Запропоновані волоконно-оптичні датчики температури та вологості, які дають змогу вирішити поставлені задачі.

Ключові слова: волоконно-оптичний датчик, температура, вологість, технологічність, взаємний вплив.

Вступ

Сьогодні розробка волоконно-оптичних датчиків є важливою сферою досліджень. Щорічно публікується безліч відповідних наукових статей, а також заявок на патенти. Патенти широко розглядаються як міст між успішними дослідженнями та розробками, з одного боку, та комерційними ринками, з іншого. Відповідно, вивчення патентних показників має центральне значення для дослідників як у галузі природничих, так і технічних

наук. Для аналізу, представленого в цій статті, використовувалися патентні дані зі Всесвітньої патентно-статистичної бази даних (PATSTAT) версії 2016b. Аналіз показує (табл.), що 90% патентних заявок на волоконно-оптичні перетворювачі за три останні роки подаються винахідниками із шести країн: США, Китаю, Республіки Корея, Саудівської Аравії, Тайваню та Японії. Багато подається міжнародних заявок.

Таблиця – Перелік країн, що отримали найбільшу кількість патентів за три останні роки

Країна	Номер патенту
США	2024060918, 2024068893, 2024090881, 2024093990, 2024118116, 2024125962, 2024133735, 2024133937, 2024151125, 2024151574, 2024160050, 2024210374, 2024210559, 2024230434, 2024235668, 2024237884, 2024239511, 2024263552, 2024272072, 2024280418, 2024302225
Китай	117516551, 117589205, 117593925, 117687450, 117705080, 117733321, 117782223, 117824609, 118050078, 118111503, 118144285, 118215432, 118224047, 118258425, 118259048, 118311393, 118369570, 118383756, 118424991, 220542253, 221037448
Республіка Корея	102633637, 102655811, 20240002019, 20240017284, 20240052106, 20240079104
Саудівська Аравія	122440486, 518400001, 521431271, 522440653, 522440748
Тайвань	202346794, 202416337
Японія	2024019821, 2024037652
Міжнародна заявка РСТ	2024020362, 2024035271, 2024065259, 2024066948, 2024091833, 2024098245, 2024103160, 2024148777, 2024155951, 2024155954, 2024167948, 2024172782, 2024177985, 2024187095, 2024187284, 2024205962, 2024206298, 2024206395

Ця проблема вирішується також на кафедрі інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» в процесі виконання договору про науково-технічне співробітництво із Міністерством освіти і науки України № 0124U002436 «Розробка сучасних вимірювальних перетворювачів фізичних величин». При цьому датчики температури та вологості розроблені за рахунок вирішення наступних поставлених задач [1]:

– запобігання взаємного впливу вимірюваних параметрів на результати вимірювання та підвищення технологічності виготовлення датчика;

– розширення функціональних можливостей прототипу.

Мета статті: розробка нових волоконно-оптичних датчиків температури та вологості направлена на ліквідацію виявлених недоліків існуючих аналогів.

Виклад основного матеріалу

Відомий волоконно-оптичний датчик клімат-контролю [2] має наступні недоліки, які обумовлені використанням спіральної ділянки світловоду та біметалевої пластини:

- необхідність постійної корекції мікронеідентичностей деформації та старіння елементів спіралі;
- неможливість компенсації деградаційних процесів, що плінуть з різною швидкістю, на вільному боці світловоду та на боці, до якого приварена біметалева пластина.

Волоконно-оптичний датчик клімат-контролю для вимірювання температури та вологості [3] має наступні недоліки, які обумовлені наявністю одного каналу вимірювання вологості та температури:

- взаємний вплив вимірювальних параметрів на результати вимірювання, що знижує їх точність;
- низька технологічність виготовлення датчика через необхідність згину світловоду і його закріплення в такому положенні.

З метою запобігання взаємного впливу вимірюваних параметрів на результати вимірювання та підвищення технологічності виготовлення порівняно з аналогами [2, 3] запропоновано волоконно-оптичний датчик для вимірювання температури та вологості [4].

На рис. 1 зображено конструкцію волоконно-оптичного датчика для вимірювання температури та вологості.

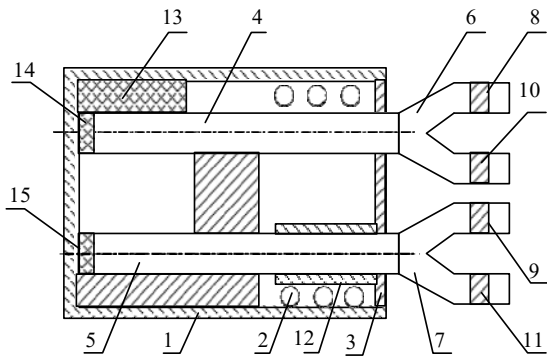


Рис. 1. Конструкція волоконно-оптичного датчика для вимірювання температури та вологості

Волоконно-оптичний датчик для вимірювання температури та вологості містить колбу 1 із кварцового скла з отворами перфорації 2, заглушку 3, до якої за допомогою плазмового зварювання приєднано основний 4 і додатковий 5 світловоди з волоконними розгалужувачами 6, 7 з вхідними 8, 9 та вихідними 10, 11 оптичними фільтрами, мідну трубку 12, яка коаксіально розташована до додаткового світловоду 5 і приварена до нього, блок гігроскопічного матеріалу 13, розташований між поверхнею колби 1 та основним світловодом 4. На торцях світловодів 4, 5 утворені віддзеркалюючі шари 14, 15.

Волоконно-оптичний датчик для вимірювання температури та вологості працює таким чином.

При зміні вологості контрольованого середовища відбувається зміна об'єму блока 13 з гігроскопічного матеріалу, унаслідок чого відбуваються зміни лінійних розмірів як блока, так і величини прогину світловоду 4. Таким чином, у основному світловоді 4 здійснюється порушення умов повного внутрішнього відбивання світла.

Порушення умов повного відбивання світла у основному світловоді 4 знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності світлового випромінювання, яке відбивається від віддзеркалювального шару 14. Величина зареєстрованого на виході оптичного фільтра 10 волоконного розгалужувача 6 випромінювання є пропорційною до величини контрольованої вологості.

При зміні температури контрольованого середовища відбувається теплове розширення мідної трубки 12, звареної з додатковим світловодом 5. Зміна геометрії трубки викликає зміну геометрії світловоду 5, що приводить до втрат потужності оптичного випромінювання. Величина зареєстрованого на виході оптичного фільтра 11 волоконного розгалужувача 7 випромінювання є пропорційною до величини зміни температури.

Таким чином, введення додаткового світловоду для вимірювання температури контрольованого середовища дає змогу запобігти взаємному впливу вимірюваних параметрів на результати вимірювання, оскільки температура та вологість вимірюються окремими незалежними каналами.

Підвищується також технологічність виготовлення датчика за рахунок використання і розміщення прямолінійних ділянок світловодів.

Недоліками цього датчика для вимірювання температури та вологості [4] є: складність конструкції, недостатня технологічність, обумовлена нанесенням віддзеркалюючих шарів на торцеві поверхні світловодів, вихідний сигнал отримується у аналоговому вигляді.

Відомий волоконно-оптичний датчик вологості [5], недоліком якого є обмежені функціональні можливості, оскільки він не дозволяє вимірювати температуру середовища, яке контролюється.

З метою розширення функціональних можливостей прототипу [5] за рахунок забезпечення вимірювання температури середовища запропоновано волоконно-оптичний датчик для вимірювання температури та вологості [6].

На рис. 2 зображено спрощену конструкцію волоконно-оптичного датчика для вимірювання температури та вологості.

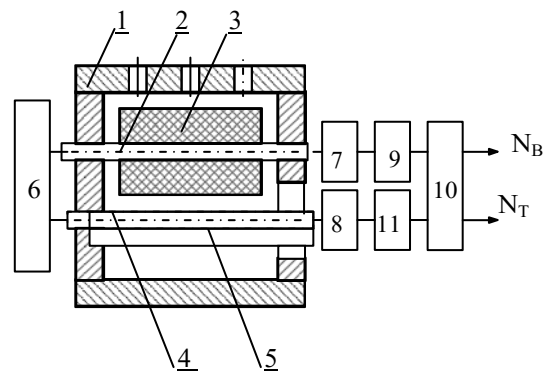


Рис. 2. Спрощена конструкція волоконно-оптичного датчика для вимірювання температури та вологості

У перфорованому корпусі 1 волоконно-оптичного датчика для вимірювання температури та вологості жорстко закріпленій світловод 2, встановлений у втулку 3 із гігроскопічного матеріалу. Додатковий світловод 4 змонтований на консольно закріпленій у корпусі 1 біметалевій пружині 5. Вхідні торці світловодів 2, 4 розміщені перед джерелом оптичного випромінювання 6, а їх вихідні торці встановлені перед відповідними фотоприймачами 7, 8. Фотоприймач 7 під'єднано до послідовно з'єднаних підсилювача 9 та аналого-цифрового перетворювача 10, а фотоприймач 8 – до електричного кола із послідовно з'єднаних підсилювача 11 та аналого-цифрового перетворювача 10.

Волоконно-оптичний датчик для вимірювання температури та вологості працює таким чином.

При змінюванні вологості середовища, що контролюється, відбувається зміна об'єму втулки 3 із гігроскопічного матеріалу. При цьому змінюються її лінійні розміри і величина прогину світловода 2. Це, у свою чергу, призводить до зміни інтенсивності світлового потоку, що поширюється від джерела оптичного випромінювання 6 до фотоприймача 7. Величина електричного сигналу з виходу фотоприймача 7 підсилюється у підсилювачі 9 та перетво-

рюється на двійковий код N_B в аналого-цифровому перетворювачі 10.

При змінюванні температури середовища прогинається біметалева пружина 5, на якій змонтовано додатковий світловод 4. Внаслідок прогину цього світловода змінюється інтенсивність світлового потоку, який поширюється від джерела оптичного випромінювання 6 до фотоприймача 8. Електричний сигнал із виходу фотоприймача 8 підсилюється у підсилювачі 11 та перетворюється на двійковий код N_T в аналого-цифровому перетворювачі 10.

Таким чином, запропонований волоконно-оптичний датчик для вимірювання температури та вологості дає змогу розширити функціональні можливості прототипу за рахунок забезпечення вимірювання температури середовища, яке контролюється.

Висновки

В результаті проведеного дослідження запропоновані волоконно-оптичні датчики температури та вологості, на які отримані патенти України на корисну модель.

В подальшому дослідженні будуть побудовані диференціальні волоконно-оптичні датчики різниці тисків.

References

1. Кошовий М. Д., Павлик Г. В. Розробка нових та удосконалення діючих волоконно-оптичних перетворювачів фізичних величин // Метрологія та прилади. 2024. № 1. С. 25 – 27.
2. Пат. на корисну модель №79525 Україна, МПК(2013.01) G02B 6/00; МПК(2006.01) G01N 25/56. Волоконно-оптичний гігмометр / А. К. Сандлер, Ю. М. Цюпко, О. А. Сандлер, К. Ю. Цюпко. – № u201212093, Бюл. № 8.
3. Пат. на корисну модель № 108519 Україна, МПК(2006.01) G02B 6/00, G01N 19/10, МПК(2015.01) G01K 5/00. Волоконно-оптичний датчик клімат-контролю для вимірювання вологості і температури / А. К. Сандлер, О. А. Сандлер, Ю. М. Цюпко, К. Ю. Цюпко. – № u201306835; заявл. 31.05.2013; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9.
4. Пат. на корисну модель № 122987 Україна, МПК(2017.01) G02B 6/00; МПК(2006.01) G01N 19/10. Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості і температури / М. Д. Кошовий, В. А. Дергачов, І. І. Кошова, О. М. Костенко, А. А. Беляєва. – № u201705818; заявл. 12.06.2017; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.
5. Пат. на корисну модель № 153837 Україна, МПК (2023.01) G02B 6/00; МПК (2006.01) G01N 19/10. Волоконно-оптичний датчик вологості / О. М. Костенко, М. Д. Кошовий, Д. В. Кураксін, А. В. Бичков, Н.Є. Ковшар, О. В. Світличний. – № u202300365; заявл. 02.02.2023, опубл. 07.09.23, Бюл. № 36.
6. Пат. на корисну модель № 155988 Україна, МПК G02B 6/00; G01N 19/10, G01K 5/00. Волоконно-оптичний датчик для вимірювання вологості та температури / О. М. Костенко, М. Д. Кошовий, Д. В. Кураксін, А. В. Бичков, Н. Є. Ковшар, О. В. Світличний. – № u 202304617; заявл. 02.10.2023; опубл. 24.04.2024, Бюл. № 16.

Надійшла (Received) 18.09.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 23.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Микола Кошовий – д.т.н., професор, професор кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: m.koshovyi@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9465-4467>.

Mikola Koshovyi – DSc, professor, professor of department intelligent measuring systems and quality engineering of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: m.koshovyi@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9465-4467>.

Олена Костенко – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна; e-mail: kostenko@pdau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5997-342X>.

Olena Kostenko – DSc, professor, professor of department of information systems and technologies Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; e-mail: kostenko@pdau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5997-342X>.

Ганна Павлик – к.т.н., доцент кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: h.pavlyk@khai.edu, <https://orcid.org/0009-0000-7045-5981>.

Hanna Pavlyk – PhD, Associate Professor of department intelligent measuring systems and quality engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: h.pavlyk@khai.edu, <https://orcid.org/0009-0000-7045-5981>.

Тетяна Рожнова – к.т.н., доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: tetiana.rozhnova@nure.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4484-8674>.

Tetiana Rozhnova – PhD, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics; e-mail: tetiana.rozhnova@nure.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4484-8674>.

Тамара Чебикіна – старший викладач кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: t.chebykina@khai.edu, <https://orcid.org/0009-0002-4926-7913>.

Tamara Chebykina – senior lecturer of department intelligent measuring systems and quality engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: t.chebykina@khai.edu, <https://orcid.org/0009-0002-4926-7913>.

Fiber-optic temperature and humidity sensors

M.D. Koshovyi, O.M. Kostenko, H.V. Pavlyk, T.G. Rozhnova, T.V. Chebykina

Abstract

Relevance of the work. When developing fiber-optic temperature and humidity sensors, the tasks of preventing the mutual influence of measured parameters on measurement results, expanding the functionality of sensors, and improving their manufacturability are relevant. Goal. Development of new fiber-optic temperature and humidity sensors. Research methods. Methods of analysis and synthesis, circuit design. Results and conclusions. Fiber-optic temperature and humidity sensors are proposed, which allow solving the tasks. Results and conclusions. As a result of the research, fiber-optic temperature and humidity sensors were proposed, for which Ukrainian patents for a utility model were obtained. In further research, differential fiber-optic pressure difference sensors will be constructed.

Keywords: fiber-optic sensors, temperature, humidity, manufacturability, mutual influence.

МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОЛОЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

І.В. Григоренко, С.М. Григоренко, С.В. Лиска, Д.В. Хроль

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інституту», м. Харків, Україна

Анотація

Для забезпечення контролю параметрів технологічних процесів у молочній промисловості необхідно використовувати вимірвальні системи, що дасть можливість проводити вимірювання всіх основних технологічних параметрів, накопичувати статистичну інформацію, аналізувати отримані данні з метою підтримки високої якості продукції, що виготовляється. У роботі розроблено структурну схему вимірвальної системи, що здатна контролювати технологію виробництва твердого сиру на основних етапах: «Резервування та дозрівання молока», «Постерилізація та охолодження молока», «Формування сиру», «Пресування сиру», «Посол сиру», «Дозрівання сиру». Завдяки впровадженню розробленої вимірвальної системи одержані результати вимірювань температури на шести етапах технологічного процесу виготовлення твердого сиру. Завдяки проведенню дисперсійного аналізу виконано перевірку метрологічної надійності датчиків температури. Складено бюджет невизначеності та встановлені межі довірчих інтервалів для випадкової похибки вимірювань.

Ключові слова: вимірвальна система, датчик, температура, дисперсійний аналіз, невизначеність.

1. Вступ

Проблеми, що пов'язані із виробництвом і контролем якості твердого сиру, як одного з основних виробів молочної промисловості, цікавлять провідних вчених усього світу. У роботі [1] оцінено склад, біохімічні, текстурні та органолептичні показники сирів у процесі дозрівання та зберігання. У дослідженні [2] проведено: «вивчення здатності різних штамів *Lactobacillus*, що виступають як захисні допоміжні культури проти зростання грибків». У роботі [3] розглянуто: «Як саме *Penicillium commune* впливає на текстурні властивості та розподіл води у твердих та надтвердих сирах». У дослідженні [4] стверджується, що: «Сир – молочний продукт, що має потенційну користь для здоров'я. Споживання сиру зросло завдяки значній різноманітності сортів, різноманітності форм випуску та змінам способу життя споживачів». У [5] проведено: «Огляд консервації твердих та напівтвердих сирів: якість та безпека» з метою «обговорити найефективніші методи забезпечення безпеки та органолептичних якостей дозрілих сирів». У цій дослідницькій роботі [5] зазначено: «першорядною метою сироваріння було збереження основних компонентів молока, і сьогодні завдяки високому вмісту білка та енергії сир є збалансованим харчовим раціоном навіть для невегетаріанців. У світі виробляється близько 3000 сортів сиру, які класифікуються як тверді, дуже тверді, м'які, напівм'які, напівтверді, залежно від вмісту вологи в сирі. В останні роки світовий ринок сиру став свідком значного зростання, що визначається різними факторами, включаючи зміну переваг споживачів на користь багатих на білок, зручних варіантів їжі».

Спираючись на дослідження світової науки є можливість стверджувати, що задача забезпечення якості твердого сиру є актуальною і потребує подальшого розвитку у напрямку визначення засобів

контролю якості при виробництві сиру.

Мета роботи. Розробка вимірвальної системи (ВС) для технологічного процесу виготовлення твердого сиру та обробка результатів вимірювань температури на основних етапах технологічного процесу для перевірки метрологічної надійності використаних датчиків.

2. Розробка структурної схеми ВС для виробництва твердого сиру

Розробка будь якої ВС завжди починається з аналізу технологічного процесу на предмет виявлення ділянок контролю і рівнів параметрів, що треба контролювати. Структурна схема ВС охоплює саме ті ділянки виробництва, які потребують автоматичного контролю. Оскільки весь технологічний процес (ТП) складається із п'ятнадцяти основних етапів, але ж тільки сім із них потребують автоматизації контролю для забезпечення підтримки точної технології виробництва. Отже виділено основні етапи, що підлягають контролю:

1. Етап «Резервування та дозрівання молока» потребує вимірювання температури, яке здійснюється за допомогою первинного вимірвального перетворювача (ПВП) ПВП 1;

2. «Постерилізація та охолодження молока» вимірювання температури виконується ПВП 2;

3. «Згортання молока» вимірювання температури виконується за допомогою ПВП 3, що вимірює температури як при згортанні так і при повторному нагріві молока;

4. «Формування сиру» вимірювання температури здійснює ПВП 4.

5. «Пресування сиру» вимірювання температури здійснює ПВП 5, а вимірювання рівня рН виконує ПВП 6.

6. «Посол сиру» вимірювання температури проводиться за допомогою ПВП 7.

7. «Дозрівання сиру» вимірювання температури у приміщенні складу виконує ПВП 8, який являє собою серію із п'яти датчиків, що розміщені по кутах приміщення та у його центрі. Вимірювання рівня вологості повітря у приміщенні здійснює ПВП 9 (рис. 1). У структуру входить також мікроконтролер, який необхідний для обробки інформації та забезпечення обміну даними з центральним комп'ютером (ЕОМ). Для стабільної роботи мікроконтролера додано

генератор синхронізуючих імпульсів, що формує необхідні для роботи синхроімпульси. Завдяки пульта управління виконується початкове налаштування мікроконтролера, та забезпечується можливість його скидання. Послідовний інтерфейс використовується для обміну даними мікропроцесора з ЕОМ. Цифровий відліковий пристрій (ЦВП) здійснює відображення поточної інформації вимірних параметрів.

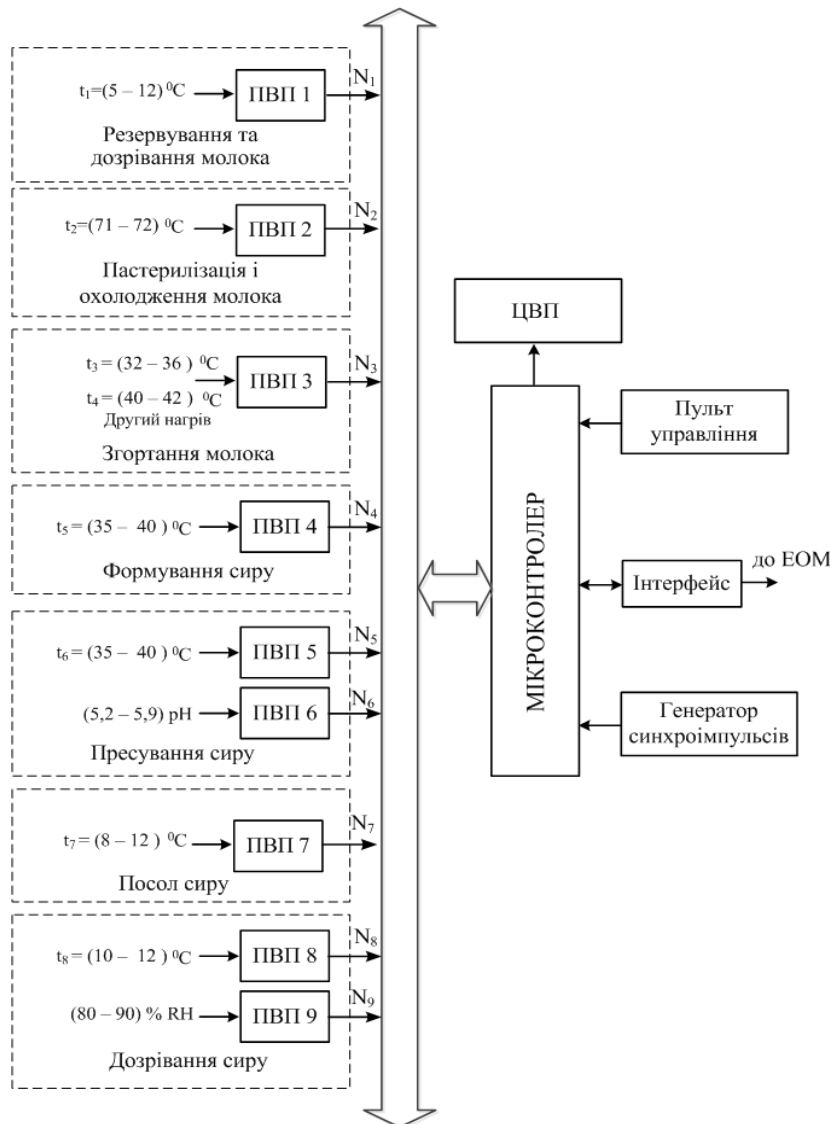


Рис. 1. Структурна схема вимірювальної системи для виробництва твердого сиру

3. Дисперсійний аналіз даних від каналів вимірювання температури ТП виготовлення твердого сиру

Виробництво твердого сиру складається із декількох етапів, на яких потрібно контролювати температуру, а саме:

1. Етап «Резервування та дозрівання молока» потребує вимірювання температури у діапазоні (+5 ... +12) °C;

2. «Пастеризація та охолодження молока» потребує вимірювання температури у діапазоні (+71 ... +72) °C;

3. «Згортання молока» потребує вимірювання температури у діапазоні (+32 ... +36) °C, а при повторному нагріві молока це діапазон (+40 ... +42) °C;

4. «Формування сиру» вимірювання температури здійснює у діапазоні (+35 ... +40) °C;

5. «Пресування сиру» потребує вимірювання температури у діапазоні $(+35 \dots +40) ^\circ\text{C}$;

6. «Посол сиру» потребує вимірювання температури у діапазоні $(+8 \dots +12) ^\circ\text{C}$.

На всіх цих етапах виробництва використовується багатозонні датчики 1-3ФТ. Оскільки вимірювання температури здійснюється у практично однакових умовах і використовуються датчиками одного типу, то виникає задача перевірки метрологічної надійності датчиків 1-3ФТ. Поставлену у роботі задачу доцільно вирішувати використанням методу дисперсійного аналізу, який дає можливість проводити порівняння дисперсій з подальшим виділенням більшої дисперсії із багатьох. Зазвичай, для перевірки однорідності дисперсій трьох і більше вибірок найчастіше застосовується тест Кохрена, який вимагає однакової кількості експериментів у кожній вибірці. Він використовується: в експериментальних дослідженнях для перевірки однорідності, у технічному контролі якості, у статистичному моделюванні для виявлення нестабільних груп, в аналізі варіацій (ANOVA).

Задача полягає у тому, щоб з'ясувати, можливо чи ні вважати відмінність більшої з отриманих дисперсій від інших випадковим явищем, або цю відмінність слід вважати суттєвою (значущою).

Для вирішення поставленої задачі виконано кожним із $m = 6$ датчиків 1-3ФТ однакова кількість вимірювань ($n = 30$). Далі, за умовами тесту Кохрена виконуються розрахунки емпіричних дисперсій $D_1 \dots D_6$ та порівнюємо найбільшу з отриманих дисперсій із сумою усіх дисперсій за формулою

$$G = \frac{D_{max}}{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6}. \quad (1)$$

У випадку, якщо значення у формулі (1) виявиться більшим за критичне значення, що отримано із таблиць тест-критерія Кохрена, відповідно до встановленого рівня значущості α , тоді відмінність максимальної за величиною дисперсії від інших є суттєвим і датчик вважається метрологічно ненадійним і його потрібно замінити.

4. Результати натурних вимірювань температури на етапах ТП

Графік спостережень за зміною температури $(10,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ на етапі «Резервування та дозрівання молока» представлено на рис. 2.

Графік спостережень за зміною температури $(+71 \dots +72) ^\circ\text{C}$ на етапі «Пастеризація та охолодження молока» представлено на рис. 3.

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні $(+33 \dots +35) ^\circ\text{C}$ на етапі «Згортання молока» представлено на рис. 4.

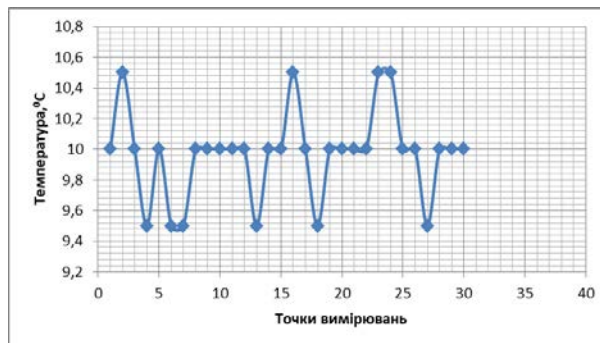


Рис. 2. Графік вимірювання температури $10,0 \pm 0,5 ^\circ\text{C}$ на етапі «Резервування та дозрівання молока»

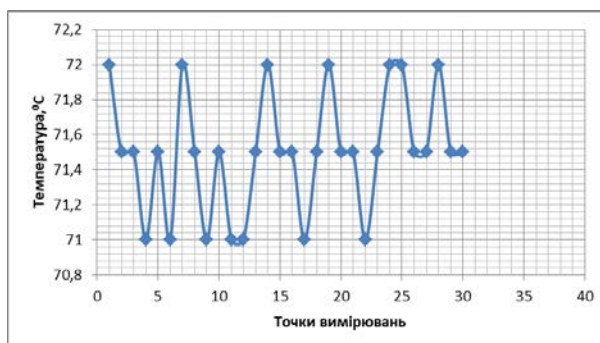


Рис. 3. Графік зміни температури у діапазоні $(+71 \dots +72) ^\circ\text{C}$ на етапі «Пастеризація та охолодження молока»

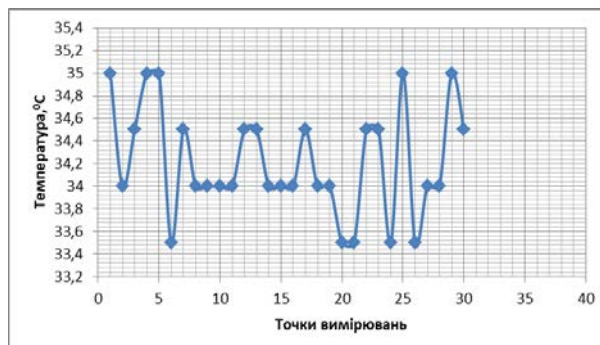


Рис. 4. Графік вимірювання температури на етапі «Згортання молока»

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні $(+35 \dots +40) ^\circ\text{C}$ на етапі «Формування сиру» представлено на рис. 5.

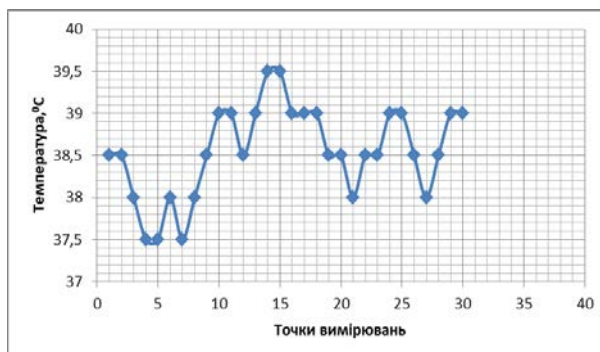


Рис. 5. Графік вимірювання температури у діапазоні $(+35 \dots +40) ^\circ\text{C}$ на етапі «Формування сиру»

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні (+38 ... +40) °C на етапі «Пресування сиру» представлено на рис. 6.

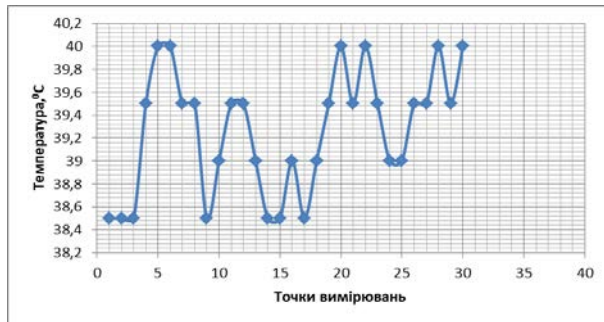


Рис. 6. Графік вимірювання температури у діапазоні (+38 ... +40) °C на етапі «Пресування сиру»

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні (+8 ... +11) °C на етапі «Посол сиру» представлено на рис. 7.

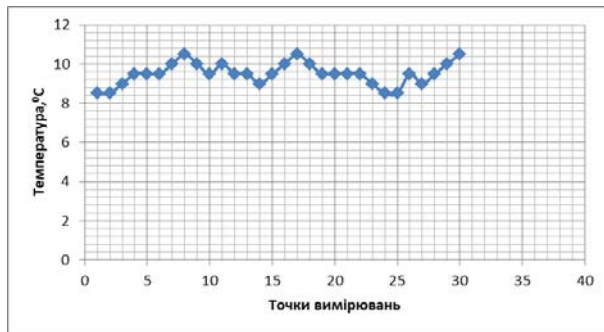


Рис. 7. Графік вимірювання температури у діапазоні (+8 ... +11) °C на етапі «Посол сиру»

5. Дисперсійний аналіз за тестом Кохрена

Незміщену оцінку дисперсії результатів багаторазових вимірювань температури на основних етапах технологічного процесу виготовлення твердого сиру визначено за формулою

$$D_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2. \quad (2)$$

1. «Резервування та дозрівання молока» $D_1 = 0,085 (C^0)^2$;
2. «Пастеризація та охолодження молока» $D_2 = 0,12 (C^0)^2$;
3. «Згортання молока» $D_3 = 0,24 (C^0)^2$;
4. «Формування сиру» $D_4 = 0,3 (C^0)^2$;
5. «Пресування сиру» $D_5 = 0,29 (C^0)^2$;
6. «Посол сиру» $D_6 = 0,33 (C^0)^2$.

Відповідно до формули (1) значення суми всіх дисперсій дорівнює

$$G = \frac{0,33}{0,085 + 0,12 + 0,24 + 0,3 + 0,29 + 0,33} = 0,242.$$

Критичне значення відхилення G при довірчій імовірності 0,95, числу ступенів вільності $m_1 = n - 1 = 6 - 1 = 5$ та об'єму вибірки $m_2 = k = 6$, визначено за таблицею G -розподілу Кохрена $G_{кр} = 0,4447$.

$$G_{кр} = 0,4447 > G = 0,242.$$

Отримане значення G є меншим за критичне значення $G_{кр}$, відповідно до встановленого рівня значущості $\alpha = 0,05$, отже відмінність максимальної дисперсії $D_6 = 0,33$ від інших є несуттєвою і датчик вважається метрологічно надійним.

6. Бюджет невизначеності для температурних каналів

На даному ТП відсутня кореляція між величинами [6], тому сумарна стандартна невизначеність, яка враховує наявність невизначеності за типами А та В вихідної величини визначається відповідно до алгоритму GUM за формулою [7]:

$$u_c(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(t)} = \sqrt{u_A^2(t) + u_B^2(t)}. \quad (3)$$

Стандартна невизначеність результатів вимірювань за типом А вхідної величини t_i розраховується за формулою [8]

$$u_A(\bar{t}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (t_{iq} - \bar{t}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (4)$$

де n_i – кількість спостережень проведених при вимірюванні t_i .

Стандартна невизначеність за типом В вхідної величини залежить від апріорної інформації про мінливість вхідної величини і визначається за формулою [8]:

$$u_B(t) = \frac{b-a}{\alpha_i}, \quad (5)$$

де α_i – коефіцієнт, що відповідає прийнятому закону розподілу у середині меж невиключеної систематичної похибки $\pm(b-a)$.

Бюджет невизначеності результатів вимірювань температури по етапам технологічного процесу виготовлення твердого сиру представлено у табл. 1.

Границі довірчого інтервалу Δ_d випадкової похибки обчислюють за формулою [10]

$$\Delta_d = \pm k_p \cdot \sigma_{\Delta}, \quad (6)$$

де k_p – квантильний коефіцієнт довіри.

Для довірчої ймовірності $P = 0,9973$, або 99,73 % [10] формула (6) приймає вигляд

$$\Delta_{0,9973} = \pm 3 \cdot \hat{\sigma}_t. \quad (7)$$

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності вимірювань температури

Вимірювана величина, °C	Вимірне значення, °C	Невизначеність за типом A, °C	Невизначеність за типом B, °C	Сумарна стандартна невизначеність, °C	Розширена невизначеність, °C
t_1	9,97	$u_A(t_1) = 0,053$	$u_B(t) = 0,25 \text{ } ^\circ\text{C}$	$u_c(t_1) = 0,255$	$U(t_1) = 0,51$
t_2	71,50	$u_A(t_2) = 0,063$		$u_c(t_2) = 0,260$	$U(t_2) = 0,52$
t_3	34,22	$u_A(t_3) = 0,089$		$u_c(t_3) = 0,265$	$U(t_3) = 0,53$
t_4	38,55	$u_A(t_4) = 0,099$		$u_c(t_4) = 0,268$	$U(t_4) = 0,536$
t_5	39,27	$u_A(t_5) = 0,098$		$u_c(t_5) = 0,268$	$U(t_5) = 0,536$
t_6	9,50	$u_A(t_6) = 0,1$		$u_c(t_6) = 0,269$	$U(t_6) = 0,538$
Ефективне число степенів вільності		$\nu_{eff} \rightarrow \infty$			
Коефіцієнт охоплення		$k = 2$			

Дослідження встановили, що датчики температури на усіх етапах технологічного процесу виготовлення твердого сиру є метрологічно надійними, тобто випадкові похибки вимірювання не перевищують встановлене значення $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}^0$ із імовірністю $P = 0,9973$.

7. Висновки

Розроблена структурна схема виміральної системи для виробництва твердого сиру Опрацьовано результати вимірювань температури

на основних етапах ТП виготовлення твердого сиру, що дозволило провести дисперсійний аналіз за тестом Кохрена серій спостережень, який довів, виконання умов не перевищення критичного значення за вказаним тестом. Отриманий результат підтверджує, що датчики температури типу 1-3ФТ, які використані на шести ділянках ТП, є метрологічно надійними. Складено бюджет невизначеності за каналами вимірювання температури. Випадкові похибки вимірювання по температурним каналам не перевищують встановлене значення із імовірністю $P = 0,9973$.

Список літератури

1. Pappa, EC, E Kondyli, A-M Vlachou, and E Malamou. 2025. «Characteristics of a Hard Cheese Manufactured Using High Heat-Treated Sheep or Mixed Sheep-Goat Milk». *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society* 76 (2):9363-74. <https://doi.org/10.12681/jhvms.39401>.
2. Asmaa H.M. Moneeb, Taha Mehany, Mohammed A. Abd-Elmonem, Adel A. Tammam, Abdel-Naser A. Zohri, Wahid I. El-Desoki, Tuba Esatbeyoglu, Probiotic Lactobacillus strains as protective adjunct cultures against fungal growth and toxin production in Hard cheese, *LWT*, Vol. 213, 2024, 117057, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117057>.
3. Jurado M, Vicente CJ. Penicillium commune affects textural properties and water distribution of hard and extra-hard cheeses. *Journal of Dairy Research*. 2020;87(1):117-122. doi:10.1017/S0022029919000906.
4. Nájera AI, Nieto S, Barron LJR, Albisu M. A Review of the Preservation of Hard and Semi-Hard Cheeses: Quality and Safety. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(18):9789. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189789>.
5. Mansha Rafiq, S., Rafiq, S.I., Gayas, B. (2025). History and Culture of Cheese Making. In: Mansha Rafiq, S. (eds) Technological Advances and Trends in Cheese Making. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94476-5_1.
6. Ihor Hryhorenko, Svitlana Hryhorenko, Oleksandr Zhuk. The use of correlation analysis in assessing the uncertainty of the influence of external factors on the result of thermal control of biological objects. *Advanced Information Systems*. Kharkiv: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2023. Vol. 7, No. 1. P. 66–70. (A)
7. JCGM (2008) Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM100:2008, BIPM, Sèvres, France.
8. Zakharov I., Nevezhnikov P., Botsiura O. Expanded Uncertainty Evaluation Taking into Account the Correlation Between Estimates of Input Quantities. *Ukrainian Metrological Journal*. 2021. No 1. P. 4–8.
9. I. Hryhorenko. Method for monitoring the functioning of information and measuring systems during operation. *Український метрологічний журнал*. – Харків, 2025. – № 2. С. 38 – 46. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2025.333842.
10. Чинков В.М. Основи метрології та виміральної техніки. Харків: НТУ «ХПІ», 2005. 524 с.

Надійшла (Received) 12.10.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 05.11.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Ігор Володимирович Григоренко – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: grigmaestro@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4905-3053.

Ihor Hryhorenko – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information and measuring technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: grigmaestro@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4905-3053.

Світлана Миколаївна Григоренко – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: sngloba@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0150-4844.

Svitlana Hryhorenko – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of technological systems and ecology monitoring, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: sngloba@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0150-4844.

Лиска Сергій Вікторович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Lyska@infiz.khpi.edu.ua. ORCID: 0009-0002-9749-3210.

Serhii.Lyska – postgraduate of the Department of Information and measuring technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Serhii.Lyska@infiz.khpi.edu.ua. ORCID: 0009-0002-9749-3210.

Хроль Давід Владиславович – магістр кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: David.Khrol@cit.khpi.edu.ua.

David.Khrol – magistr of the Department of Information and measuring technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: David.Khrol@cit.khpi.edu.ua.

METROLOGICAL RESEARCH OF THE MEASURING SYSTEM FOR THE DAIRY INDUSTRY

I.V. Hryhorenko, S.M. Hryhorenko, S.V. Lyska, D.V. Khrol

Abstract

To ensure control of technological process parameters in the dairy industry, it is necessary to use measuring systems that will make it possible to measure all the main technological parameters, accumulate statistical information, and analyze the data obtained in order to maintain high quality of the products being manufactured. The work has developed a structural diagram of a measuring system that is able to control the technology of hard cheese production at the main stages: «Milk storage and ripening», «Milk sterilization and cooling», «Cheese formation», «Cheese pressing», «Cheese transfer», «Cheese ripening». Thanks to the implementation of the developed measuring system, the results of temperature measurements at six stages of the technological process of hard cheese production were obtained. Thanks to the analysis of variance, the metrological reliability of temperature sensors was checked. An uncertainty budget was compiled and confidence intervals for random measurement error were established.

Key words: measuring system, sensor, temperature, variance analysis, uncertainty.

УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ЗАСАДАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ

О.Є. Середюк, М.В. Смаглюк

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Анотація

Виконаний аналіз нормативних документів України, які регламентують актуальність обліку природного газу в одиницях енергії. Розглянуті сучасні підходи до реалізації інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) обчислення об'єму природного газу з конкретизацією їх недоліків. Охарактеризовані особливості розробленої централізованої ІВС збору даних з вузлів обліку газу на базі розробленого програмного комплексу «Веє-UGV». Викладені концепції технічної реалізації створеної в АТ «Укргазвидобування» ІВС при визначенні об'єму, теплоти згоряння та енергії природного газу в одній або декількох точках за маршрутом газопостачання.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, природний газ, об'єм, енергія, фізико-хімічні параметри, програмний комплекс.

1. Вступ

Газова промисловість України відноситься до числа практично найпотужніших у світі за обсягом можливості транзиту та зберігання блакитного палива, а також є однією з найбільших в континентальній Європі за обсягами його власного видобутку та розподілу. Незважаючи на це, сьогоднішній стан економіки України вимагає раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів, серед яких природний газ займає чільне місце у багатьох напрямках його кінцевого споживання. За даними Державної служби статистики України у 2020 році споживання розподілялося: промисловість – 21,3%, транспорт – 5%, комунально-побутовий сектор – 56,5%, неенергетичне використання – 17,2%. При цьому енергетичний баланс України в 2020 році становив близько 29,3 млрд. куб. метрів. Хоча на теперішній воєнний час аналогічні дані відсутні, однак актуальність правильного і точного обліку природного газу не зменшилася.

Тому вирішення завдань економії природного газу із застосуванням сучасних методологічних підходів до його обліку є актуальною науково-практичною задачею, яка може бути вирішена на базі запровадження сучасних інформаційно-вимірювальних систем обліку природного газу.

Визначення обсягів природного газу при видобутку транспортуванні, розподілі та зберіганні на даний час здійснюється в одиницях об'єму, а визначення якості газу відбувається на газовимірювальних станціях (ГВС) і пунктах виміру витрати газу (ПВВГ) при його передачі між суб'єктами ринку природного газу.

Ще в 2021 році в Україні було прийнято ряд нормативних документів з метою визначення вартості природного газу виходячи з параметрів його якості як товару (енергетичної цінності) та приведення параметрів природного газу на

внутрішньому ринку до його параметрів на митному кордоні України з державами - членами Європейського Союзу, що є передумовою інтеграції ринку природного газу України з ринком природного газу Європейського Союзу.

Основним документом став Закон України №1850-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії» [1], який передбачає перехід на облік природного газу в одиницях енергії та за змінених стандартних умов. Закон передбачає перехід на методику обчислення кількості газу в кіловат-годинах замість кубометрів за стандартних умов.

Станом на сьогоднішній день методи визначення кількості природного газу в одиницях енергії, описані в нормативних документах [2-5]. В них запропоновано визначати кількість енергії, що міститься в заданій кількості газу, шляхом множення теплоти згоряння цього газу на його об'єм за двома способами: шляхом вимірювання енергії або шляхом її визначення (обчислення) згідно [5].

На даний час в промислових умовах відсутня можливість прямого вимірювання енергії природного газу. Тому кількість його енергії визначається шляхом обчислення. Це підкреслює необхідність подальшого дослідження інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) для практичного вирішення завдань обліку природного газу в одиницях енергії і досягнення при цьому підвищення точності і достовірності такого обліку.

Метою статті є розроблення удосконаленої ІВС обліку природного газу в одиницях енергії шляхом застосування нових інформаційних, технічних і концептуальних підходів для її реалізації.

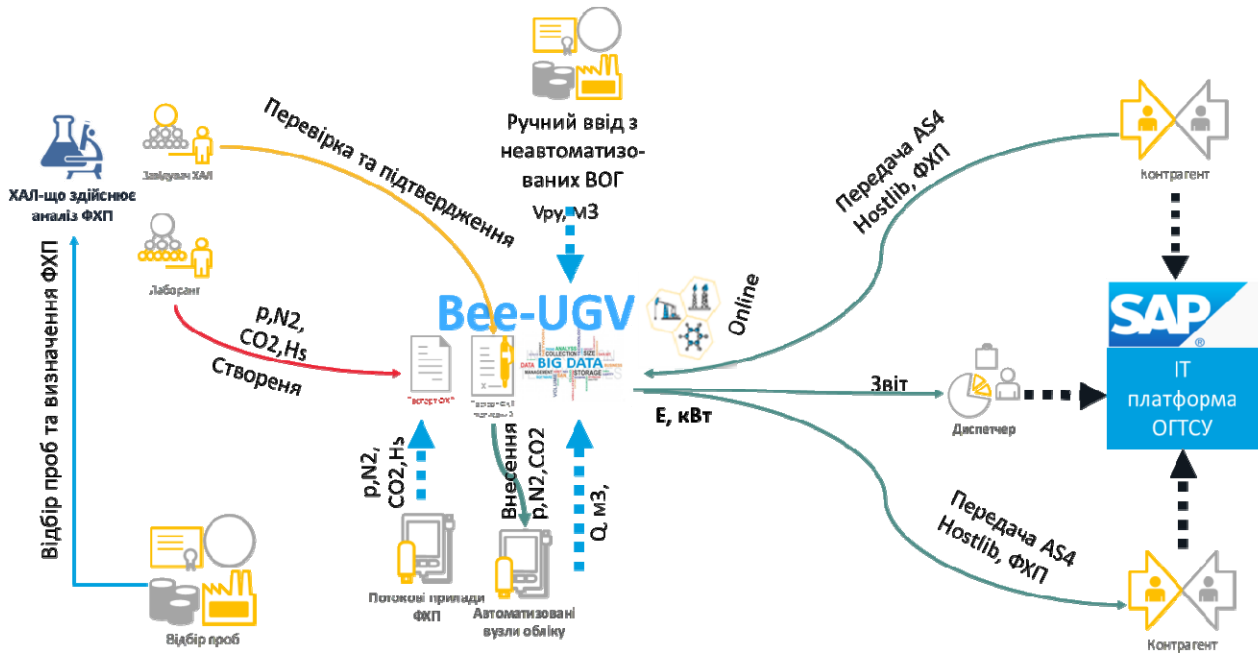


Рис. 1. Схема функціонування ІВС на базі «Bee-UGV» з визначення енергії та обміну даними

2. Виклад основного матеріалу

Обчислення енергії базується на окремому вимірюванні об'єму або маси природного газу та його теплоти згоряння. Згідно [5] кількість енергії, що міститься в заданій кількості газу, визначають множенням теплоти його згоряння на відповідну кількість газу.

Основними документами, які регламентують функціонування газотранспортної системи, газорозподільних систем, газосховищ та всіх інших суб'єктів ринку природного газу, в тому числі і в питанні особливостей обліку природного газу, є кодекси [2-4]. В цих документах також зазначено способи обчислення енергії лише шляхом окремого вимірювання об'єму природного газу та його теплоти згоряння.

За визначенням ДСТУ EN 1776:2014 [6], для виконання досліджуваного виду вимірювань використовують вимірювальні системи кількості природного газу та вимірювальні системи якості природного газу.

Для вимірювання кількості природного газу при транспортуванні та розподілі використовуються ПВВГ, які часто носять назву вузлів обліку газу.

Згідно визначення Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 13 січня 2016 р. № 94, ПВВГ визначаються як «автоматизовані системи контролю і обліку енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, води, нафтопродуктів, тощо) для електронних систем або систем, що містять програмний продукт».

Вимірювальні системи якості природного газу визначають фізико-хімічні показники (ФХП)

природного газу, які є не тільки його якісною характеристикою, а також невід'ємною частиною процесу визначення об'єму газу.

Основні компоненти природного газу, що вносяться до обчислювачів та коректорів природного газу для його приведення до стандартних умов - густина, вміст діоксиду вуглецю та азоту. Значення цих компонентів визначаються методом газової хроматографії, за даними якої також розраховується значення теплоти згоряння природного газу згідно ДСТУ ISO 6976:2009 [7].

Отже, як бачимо з наведених вище матеріалів, станом на сьогоднішній день дуже складно забезпечити обчислення кількості природного газу існуючими вимірювальними системами кількості та якості, які розроблялися для вимірювання об'єму природного газу. Цьому заважає три суттєвих фактори.

Перший, це обчислювачі, виготовлені до 2021 року, які не мають можливість обчислення кількості природного газу в одиницях енергії та за змінених стандартних умов. Їх заміна чи модернізація на всіх точках приймання-передавання природного газу газової промисловості України потребуватиме значних фінансових затрат. І це не вирішить питання малих та побутових споживачів природного газу.

Другим фактором є відсутність методики повірки цих обчислювачів для визначення кількості природного газу в одиницях енергії, що може привести до неможливості отримання необхідних документів для введення цих обчислювачів у складі вимірювальних систем в комерційну експлуатацію.

Третій фактор – це нерегульованість та відсутність уніфікації маршрутів постачання природного газу з даними ФХП, а також розгалуженість та складність газових мереж.

Найпростішим та найдешевшим рішенням вбачається удосконалення ІВС обліку природного газу в одиницях енергії за допомогою програмних комплексів (ПК) автоматизованого збору даних з вимірювальних систем кількості та якості природного газу.

Застосування ПК дозволить забезпечити оперативний збір даних про кількісні та якісні показники природного газу, дасть можливість моделювати складні газові мережі згідно маршрутів переміщення природного газу та централізоване віддалене обчислення кількості природного газу в одиницях енергії.

З врахуванням цього в АТ «Укргазвидобування» розроблено централізовану інформаційно-вимірювальну систему збору даних з вузлів обліку [9] на базі програмного комплексу «Bee-UGV» [10] (скорочено ПК «Bee-UGV»). (рис.1)

На даний час ПК «Bee-UGV» має промислове застосування в АТ «Укргазвидобування» та забезпечує:

1. Автоматичний та ручний збір інформації з ПБВГ, автоматичних потокових і лабораторних приладів визначення ФХП природного газу.
2. Зберігання отриманої інформації в базі даних та можливість отримувати її суміжними системами та користувачами.
3. Автоматичне та ручне внесення отриманої інформації про ФХП природного газу від приладів

визначення ФХП до обчислювачів та коректорів витрати природного газу.

4. Автоматичне обчислення об'єму природного газу згідно ДСТУ 9231:2023 «Лічильники газу побутові. Метод перетворення вимірюваного об'єму природного газу до стандартних умов».

5. Автоматичне обчислення кількості природного газу на підставі значення вищої теплоти згоряння отриманої від потокових та лабораторних приладів визначення якості природного газу та значення об'єму природного газу отриманого від обчислювачів, коректорів та лічильників природного газу.

6. Автоматичне визначення температури точки роси за вологою та вологовміст природного газу за абсолютного тиску 3,92 МПа.

Даний ПК дозволяє забезпечувати обчислення природного газу як в одній точці, за умови наявності на ПБВГ потокових приладів визначення ФХП, так і централізоване, віддалене, дистанційне обчислення кількості природного газу в одиницях енергії за умови визначення теплоти згоряння для ПБВГ хіміко-аналітичними лабораторіями та приписування її згідно маршруту ФХП.

Концепція технічної реалізації розробленої ІВС із ПК «Bee-UGV» при визначенні об'єму, теплоти згоряння та енергії в одній точці маршруту при визначенні ФХП хіміко-аналітичною лабораторією наведена на рис. 2.

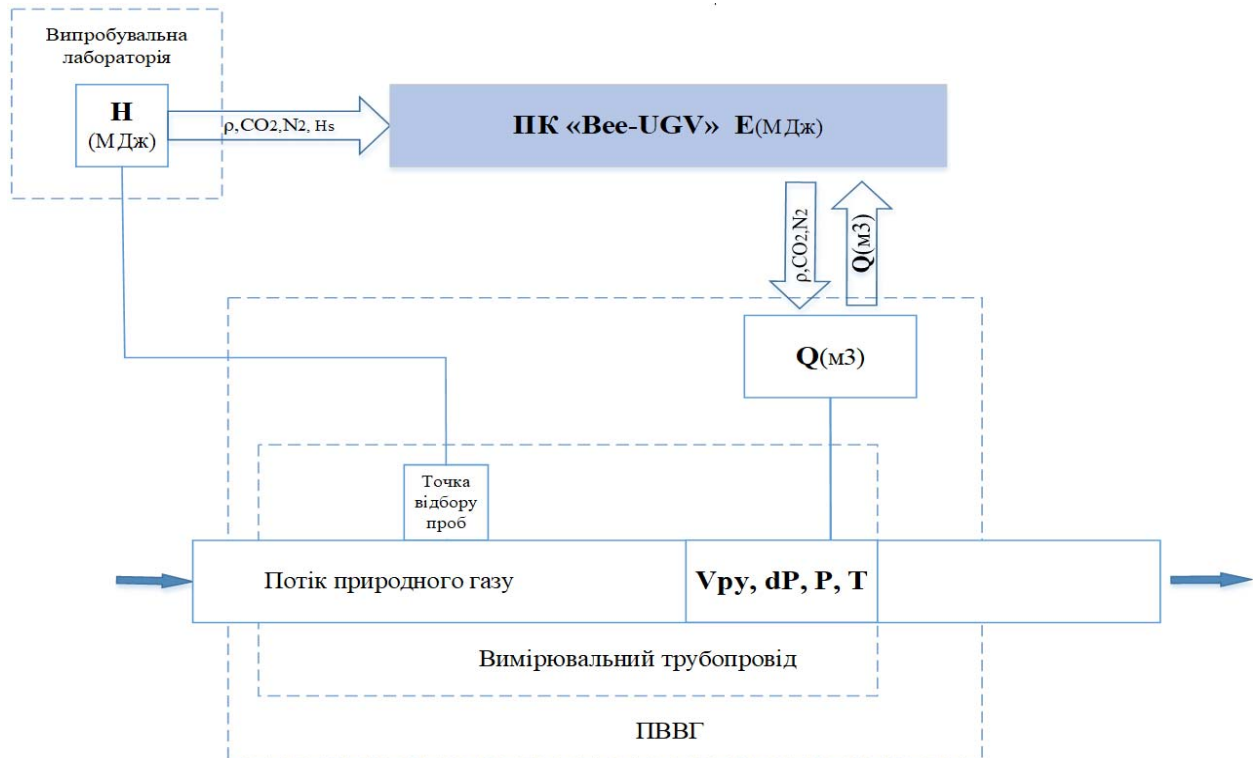


Рис. 2. Схема функціонування ІВС для однієї точки маршруту природного газу

Концепція технічної реалізації розробленої ІВС із ПК «Bee-UGV» при здійсненні постачання

природного газу за маршрутом багатоточкового контролю ФХП наведена на рис. 3.

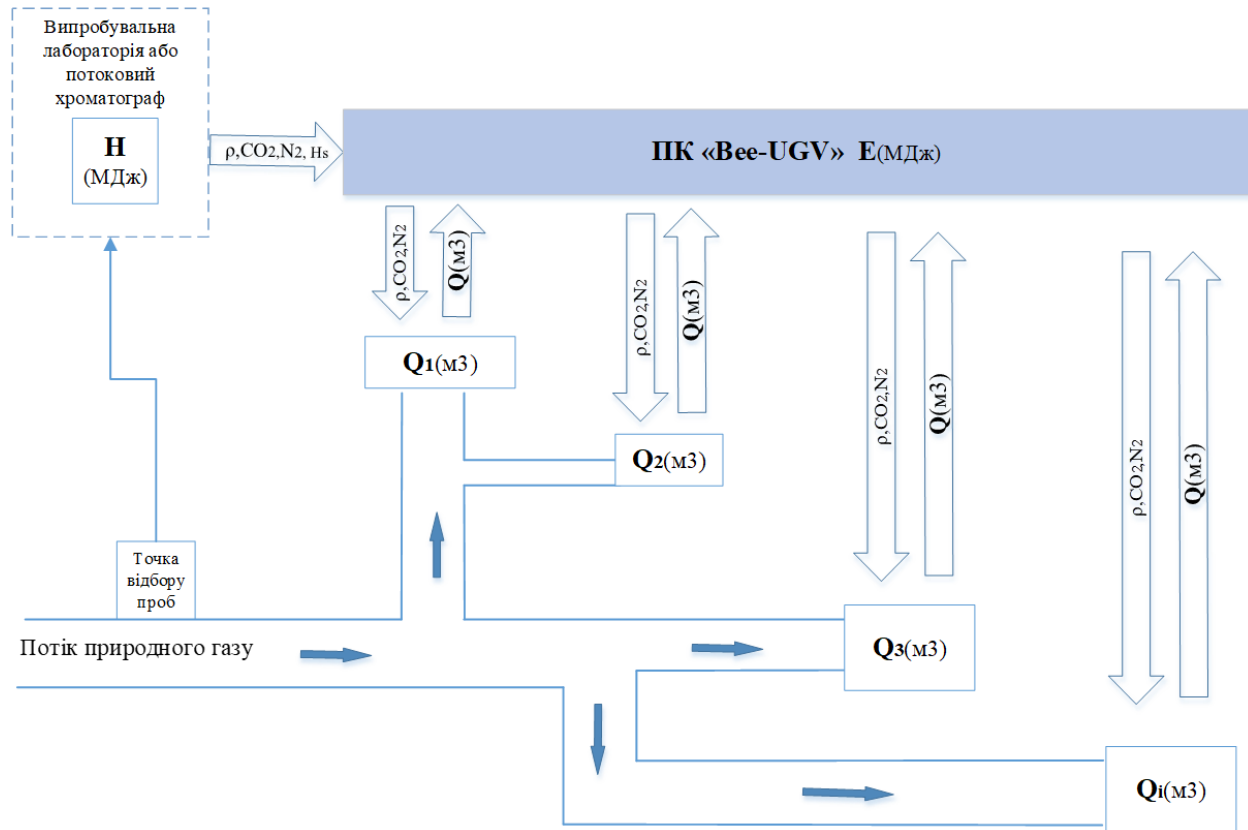


Рис. 3. Схема визначення об'єму, теплоти згоряння та енергії природного газу за маршрутом для декількох точок

3. Висновки

Розроблена централізована ІВС забезпечує облік природного газу в одиницях енергії, що відповідає сучасним нормативним документам України у цій сфері.

Наявність у складі ІВС програмного комплексу «Bee-UGV», захищеного свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір, характеризує новизну

технічного рішення удосконалення ІВС.

Завдяки реалізації в удосконаленій ІВС програмного комплексу «Bee-UGV» вдалося автоматизувати процес автоматичного збору даних з інформаційно-вимірювальних систем кількості та якості природного газу та автоматизувати процес розрахунку природного газу в одиницях енергії і обміну інформацією на ринку природного газу.

Список літератури

1. Закон України №1850-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії» від 02.11.2021. Із змінами, внесеними згідно із Законами № 1974-IX від 16.12.2021, № 2372- IX від 08.07.2022.
2. Кодекс газотранспортної системи. Затверджено Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №2493 від 30.09.2015.
3. Кодекс газорозподільних систем. Затверджено Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №2494 від 30.09.2015.
4. Кодекс газосховищ. Затверджено Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №2495 від 30.09.2015
5. ДСТУ EN ISO 15112:2020. Газ природний. Визначання енергії.
6. ДСТУ EN 1776:2014. Газовимірювальні станції. Функційні вимоги.
7. ДСТУ ISO 6976:2009. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу.
8. Середюк О.Є., Смаглюк М.В. Централізована інформаційно-вимірювальна система збору даних з вузлів обліку газу. *Приладобудування: стан і перспективи*: збірник матеріалів XXIII міжнар. наук.-техн. конф. м. Київ, 14-15 травня 2024р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПФФ, 2024. С. 297-299.
9. Федоренко С.Г., Юрченко В.П., Смаглюк М.В. Комп'ютерна програма та база даних “Програмний комплекс автоматизованого збору даних з вузлів обліку АТ “Укргазвидобування” (“Bee-UGV”)”. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 117326. Дата реєстрації 21.03.2023р.

Надійшла (Received) 14.10.2026

Прийнята до друку (accepted for publication) 16.11.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Середюк Орест Євгенович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, e-mail: mivt@nung.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8539-2693;

Orest Serediuk – DSc, professor, Professor of the Department of Information and Measurement Technologies and Energy Management, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; e-mail: mivt@nung.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8539-2693;

Смаглюк Микола Васильович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, e-mail: mykola.smaglyuk@ugv.com.ua, ORCID: 0009-0002-8233-7389.

Mykola Smahliuk – postgraduate student of the Department of Information and Measurement Technologies and Energy Management, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: mykola.smaglyuk@ugv.com.ua, ORCID: 0009-0002-8233-7389.

Improvement of information and measurement systems for natural gas accounting on the basis of energy value

O.Ye. Serediuk, M.V.Smahliuk

Abstract

The analysis of regulatory documents of Ukraine regulating the relevance of natural gas metering in energy units is carried out. Modern approaches to the implementation of information and measuring systems (IMS) for calculating the volume of natural gas are considered, specifying their shortcomings. The features of the developed centralized IMS for collecting data from gas metering nodes based on the developed software complex "Bee-UGV" are characterized. The concepts of technical implementation of the IMS created in JSC "Ukrgazvydobuvannya" for determining the volume, calorific value and energy of natural gas at one or more points along the gas supply route are outlined.

Key words: information and measuring system, natural gas, volume, energy, physicochemical parameters, software complex.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАКЛАДНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ВИХОРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Ю. В. Хомяк, Т. В. Дроздова, І. К. Корнєв, М. С. Носков

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Анотація

У статті представлено результати теоретичного дослідження взаємодії вихорострумового перетворювача (ВСП) з феромагнітним зразком, що містить поверхневу тріщину. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення достовірності та селективності вихорострумового неруйнівного контролю металевих виробів, особливо у випадках, коли класичні ВСП демонструють низьку стійкість до впливу змін зазору, магнітної проникності та електропровідності об'єкта контролю. Для усунення цих недоліків авторами розроблено ортогональний вихорострумний перетворювач, який забезпечує просторове розділення функцій збудження та реєстрації сигналу. Запропоновано математичну модель взаємодії ВСП із поверхневою тріщиною, що враховує поверхневий характер вихрових струмів та їх орієнтацію вздовж дефекту. У моделі обмотки перетворювача подано у вигляді ідеалізованих провідників, що дозволяє аналітично описати вплив геометричних параметрів ВСП і зразка на вихідний сигнал. Отримано залежності амплітуди сигналу від кутового положення перетворювача, розміру тріщини, зазору між ВСП і поверхнею, а також від співвідношення розмірів збуджувальної та вимірювальної обмоток.

Ключові слова: вихорострумний перетворювач, вимірювальна обмотка, дефект, феромагніт, математичне моделювання, тріщина, контроль електромагнітна проникність, геометричні параметри.

1. Вступ

Сучасні вихорострумні дефектоскопи переважно оснащені вихорострумними перетворювачами (ВСП), які одночасно реагують на початкове електромагнітне поле та на поле, зумовлене наявністю дефектів, – так звані «класичні ВСП» [1,2]. Такі перетворювачі виконують дві основні функції: створюють збуджувальне поле та здійснюють реєстрацію вихрових струмів у контрольованому об'єкті. Однак об'єднання процесів збудження й вимірювання в одній конструкції не завжди є перевагою. У більшості випадків це недолік, оскільки не дозволяє оптимально розташувати вимірювальну обмотку відносно джерела збудження, що могло б підвищити селективність методу [3].

З метою підвищення ефективності вихорострумової дефектоскопії металовиробів авторами було створено ортогональний вихорострумний перетворювач [4]. Використання такого пристрою дає можливість отримати більш достовірну інформацію про дефекти, одночасно компенсуючи вплив небажаних факторів: зміни зазору, магнітної проникності та електропровідності контрольованого об'єкта тощо.

Мета статті – дослідження математичної моделі взаємодії вихорострумного перетворювача з феромагнітним зразком із тріщиною.

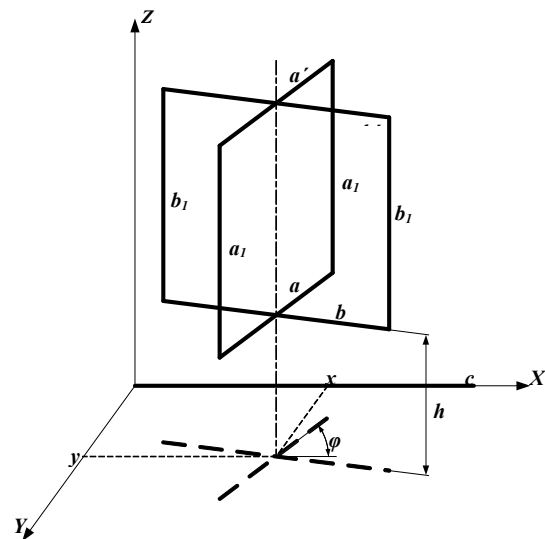
2. Виклад основного матеріалу

Для математичного опису процесів було запропоновано модель взаємодії ВСП з об'єктом, що містить поверхневу тріщину.

У межах цієї моделі вводяться припущення та обмеження: вихрові струми в матеріалі мають поверхневий характер та переважно орієнтовані вздовж дефекту. Таким чином, тріщина розглядається як

відрізок ідеально тонкого провідника, по якому протікає струм. Обмотки перетворювача у моделі подаються у вигляді нескінченно тонких провідників, контури яких відтворюють форму витків (рис. 1).

В роботі [8] здійснено теоретичний аналіз функціонування накладного трансформаторного вихорострумного перетворювача. Показано, що вихідна напруга ВСП визначається як функція добутку взаємних індуктивностей його обмоток з об'єктом контролю (ОК).



a – нижня ділянка збуджувальної обмотки; b – нижня ділянка вимірювальної обмотки; a_1 – бічна сторона збуджувальної обмотки; b_1 – бічна сторона вимірювальної обмотки; a' – верхня ділянка збуджувальної обмотки; b' – верхня ділянка вимірювальної обмотки; c – дефект; x, y – координати проєкції центральної частини перетворювача; h – відстань між площиною дефекту та перетворювачем; φ – кут між дефектом і ділянкою збуджувальної обмотки

Рис. 1. Розрахункова модель взаємодії ВСП із тріщиною

$$U = f(M_{12} \cdot M_{23}), \quad (1)$$

де U – сигнал вимірювальної обмотки; M_{12} – взаємна індуктивність між збуджувальною обмоткою та об'єктом контролю (ОК); M_{23} – взаємна індуктивність між вимірювальною обмоткою та ОК.

З попереднього аналізу цієї моделі (рис. 1) випливає, що бічні ділянки збуджувальної та вимірювальної обмоток (a_1 і b_1) мають нульову взаємну індуктивність із дефектом, оскільки вони орієнтовані перпендикулярно до нього. Тому подальший розгляд зосередимо на взаємних індуктивностях M_{ac} , $M_{a'c}$, M_{bc} , $M_{b'c}$ ділянок a , a' , b , b' з дефектом c . Тоді

$$M_{12} = M_{ac} - M_{a'c}, \quad M_{23} = M_{bc} - M_{b'c}. \quad (2)$$

Визначимо зазначені взаємні індуктивності за методикою [9], використовуючи геометричні параметри ВСП та координати відповідно до рис. 1.

$$M_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cos \varphi \left[\chi_{2ac} \operatorname{arth} \left(\frac{a}{D_{22ac} + D_{21ac}} \right) + \gamma_{2ac} \operatorname{arth} \left(\frac{c}{D_{22ac} + D_{12ac}} \right) - \chi_{1ac} \operatorname{arth} \left(\frac{a}{D_{11ac} + D_{12ac}} \right) - \gamma_{1ac} \operatorname{arth} \left(\frac{c}{D_{11ac} + D_{21ac}} \right) + \frac{h}{\sin \varphi} A_{ac} \right], \quad (3)$$

де χ_{2ac} – відстань дальнього кінця відрізка c до спільного перпендикуляра з a ; γ_{2ac} – відстань від дальнього кінця відрізка a до спільного перпендикуляра з c ; χ_{1ac} – відстань від ближнього кінця відрізка c до спільного перпендикуляра з a ; γ_{1ac} – відстань від ближнього кінця відрізка a до спільного перпендикуляра з c ; D_{11ac} – відстань між ближніми кінцями відрізків a і c ; D_{12ac} – відстань між ближнім кінцем відрізка c і дальнім кінцем відрізка a ; D_{21ac} – відстань між ближнім кінцем відрізка a і дальнім кінцем відрізка c ; D_{22ac} – відстань між дальніми кінцями відрізків a і c ; A_{ac} – коефіцієнт впливу зазору h .

Перелічені величини визначаються за формулами (4–12):

$$D_{11ac} = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + h^2}; \quad (4)$$

$$D_{12ac} = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + h^2}; \quad (5)$$

$$D_{21ac} = \sqrt{\left(c - x + \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + h^2}; \quad (6)$$

$$D_{22ac} = \sqrt{\left(c - x - \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + h^2}; \quad (7)$$

$$k_{ac}^2 = D_{12ac}^2 + D_{21ac}^2 - D_{11ac}^2 - D_{22ac}^2; \quad (8)$$

$$\chi_{1ac} = \frac{2a^2 (D_{21ac}^2 - D_{11ac}^2 - c^2) + k_{ac}^2 (D_{12ac}^2 - D_{11ac}^2 - a^2)}{4c^2 a^2 - k_{ac}^4}; \quad (9)$$

$$\gamma_{1ac} = \frac{2c^2 (D_{12ac}^2 - D_{11ac}^2 - a^2) + k_{ac}^2 (D_{21ac}^2 - D_{11ac}^2 - c^2)}{4c^2 a^2 - k_{ac}^4}; \quad (10)$$

$$\chi_{2ac} = \chi_{1ac} + c, \quad \gamma_{2ac} = \gamma_{1ac} + a; \quad (11)$$

$$A_{ac} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\chi_{1ac} + \gamma_{1ac} + D_{11ac} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{h} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\chi_{2ac} + \gamma_{2ac} + D_{22ac} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{h} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\chi_{1ac} + \gamma_{2ac} + D_{12ac} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{h} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\chi_{2ac} + \gamma_{1ac} + D_{21ac} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{h} \right). \quad (12)$$

Аналогічно для взаємоіндуктивності між a' та c з урахуванням того, що $a' = a$:

$$M_{a'c} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cos \varphi \left[\chi_{2a'c} \operatorname{arth} \left(\frac{a}{D_{22a'c} + D_{21a'c}} \right) + \gamma_{2a'c} \operatorname{arth} \left(\frac{c}{D_{22a'c} + D_{12a'c}} \right) - \chi_{1a'c} \operatorname{arth} \left(\frac{a}{D_{11a'c} + D_{12a'c}} \right) - \gamma_{1a'c} \operatorname{arth} \left(\frac{c}{D_{11a'c} + D_{21a'c}} \right) + \frac{(h+a_1)}{\sin \varphi} A_{a'c} \right], \quad (13)$$

де $\chi_{2a'c}$ – відстань далекого кінця відрізка до загального перпендикуляра з a' ; $\gamma_{2a'c}$ – відстань далекого кінця відрізка a' до загального перпендикуляра з c ; $\chi_{1a'c}$ – відстань ближнього кінця відрізка до загального перпендикуляра з a' ; $\gamma_{1a'c}$ – відстань ближнього кінця відрізка a' до загального перпендикуляра з c ; $D_{11a'c}$ – відстань між ближніми кінцями відрізків a' і c ; $D_{12a'c}$ – відстань між ближнім кінцем відрізка з далеким кінцем відрізка a' ; $D_{21a'c}$ – відстань між ближнім кінцем відрізка a' і далеким кінцем відрізка c ; $D_{22a'c}$ – відстань між дальніми кінцями відрізків a' і c ; $A_{a'c}$ – коефіцієнт впливу зазору $h+a_1$.

Перелічені величини перебувають за формулами (14–22):

$$D_{11a'c} = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + (h+a_1)^2}; \quad (14)$$

$$D_{12a'c} = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + (h+a_1)^2}; \quad (15)$$

$$D_{21a'c} = \sqrt{\left(c - x + \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + (h+a_1)^2}; \quad (16)$$

$$D_{22a'c} = \sqrt{\left(c - x - \frac{a}{2} \cos \varphi\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi\right)^2 + (h+a_1)^2}; \quad (17)$$

$$k_{a'c}^2 = D_{12a'c}^2 + D_{21a'c}^2 - D_{11a'c}^2 - D_{22a'c}^2; \quad (18)$$

$$\chi_{1a'c} = \frac{2a^2 (D_{21a'c}^2 - D_{11a'c}^2 - c^2) + k_{a'c}^2 (D_{12a'c}^2 - D_{11a'c}^2 - a^2)}{4c^2 a^2 - k_{a'c}^4}; \quad (19)$$

$$\gamma_{1_{a'c}} = \frac{2c^2(D_{12_{a'c}}^2 - D_{11_{a'c}}^2 - a^2) + k_{a'c}^2(D_{21_{a'c}}^2 - D_{11_{a'c}}^2 - c^2)}{4c^2a^2 - k_{a'c}^4} a; \quad (20)$$

$$\chi_{2_{a'c}} = \chi_{1_{a'c}} + c, \quad \gamma_{2_{a'c}} = \gamma_{1_{a'c}} + a; \quad (21)$$

$$A_{a'c} = \arctg\left(\frac{\chi_{1_{a'c}} + \gamma_{1_{a'c}} + D_{11_{a'c}}}{h+a_1} \operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right) + \arctg\left(\frac{\chi_{2_{a'c}} + \gamma_{2_{a'c}} + D_{22_{a'c}}}{h+a_1} \operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right) - \arctg\left(\frac{\chi_{1_{a'c}} + \gamma_{2_{a'c}} + D_{12_{a'c}}}{h+a_1} \operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right) - \arctg\left(\frac{\chi_{2_{a'c}} + \gamma_{1_{a'c}} + D_{21_{a'c}}}{h+a_1} \operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right). \quad (22)$$

Для взаємодуктивності між відрізками b та c , запишемо:

$$M_{bc} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sin\varphi \left[\chi_{2_{bc}} \operatorname{arth}\left(\frac{b}{D_{22_{bc}} + D_{21_{bc}}}\right) + \gamma_{2_{bc}} \operatorname{arth}\left(\frac{c}{D_{22_{bc}} + D_{12_{bc}}}\right) - \chi_{1_{bc}} \operatorname{arth}\left(\frac{b}{D_{11_{bc}} + D_{12_{bc}}}\right) - \gamma_{1_{bc}} \operatorname{arth}\left(\frac{c}{D_{11_{bc}} + D_{21_{bc}}}\right) + \frac{h}{\cos\varphi} A_{bc} \right], \quad (23)$$

де $\chi_{2_{bc}}$ – відстань далекого кінця відрізка до загального перпендикуляра з b ; $\gamma_{2_{bc}}$ – відстань далекого кінця відрізка b до загального перпендикуляра з c ; $\chi_{1_{bc}}$ – відстань ближнього кінця відрізка до загального перпендикуляра з b ; $\gamma_{1_{bc}}$ – відстань ближнього кінця відрізка b до загального перпендикуляра з c ; $D_{11_{bc}}$ – відстань між ближніми кінцями відрізків b і c ; $D_{12_{bc}}$ – відстань між ближнім кінцем відрізка з далеким кінцем відрізка b ; $D_{21_{bc}}$ – відстань між ближнім кінцем відрізка b і далеким кінцем відрізка c ; $D_{22_{bc}}$ – відстань між дальніми кінцями відрізків b і c ; A_{bc} – коефіцієнт впливу зазору h .

Перелічені величини перебувають за формулами (24-32):

$$D_{11_{bc}} = \sqrt{\left(x - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + h^2; \quad (24)$$

$$D_{12_{bc}} = \sqrt{\left(x + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + h^2; \quad (25)$$

$$D_{21_{bc}} = \sqrt{\left(c - x + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + h^2; \quad (26)$$

$$D_{22_{bc}} = \sqrt{\left(c - x - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + h^2; \quad (27)$$

$$k_{bc}^2 = D_{12_{bc}}^2 + D_{21_{bc}}^2 + D_{11_{bc}}^2 - D_{22_{bc}}^2; \quad (28)$$

$$\chi_{1_{bc}} = \frac{2b^2(D_{21_{bc}}^2 - D_{11_{bc}}^2 - c^2) + k_{bc}^2(D_{12_{bc}}^2 - D_{11_{bc}}^2 - b^2)}{4c^2b^2 - k_{bc}^4} c; \quad (29)$$

$$\gamma_{1_{bc}} = \frac{2c^2(D_{12_{bc}}^2 - D_{11_{bc}}^2 - b^2) + k_{bc}^2(D_{21_{bc}}^2 - D_{11_{bc}}^2 - c^2)}{4c^2b^2 - k_{bc}^4} b; \quad (30)$$

$$\chi_{2_{bc}} = \chi_{1_{bc}} + c, \quad \gamma_{2_{bc}} = \gamma_{1_{bc}} + b; \quad (31)$$

$$A_{bc} = \arctg\left[\frac{\chi_{1_{bc}} + \gamma_{1_{bc}} + D_{11_{bc}}}{h} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right] + \arctg\left[\frac{\chi_{2_{bc}} + \gamma_{2_{bc}} + D_{22_{bc}}}{h} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right] - \arctg\left[\frac{\chi_{1_{bc}} + \gamma_{2_{bc}} + D_{12_{bc}}}{h} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right] - \arctg\left[\frac{\chi_{2_{bc}} + \gamma_{1_{bc}} + D_{21_{bc}}}{h} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right]. \quad (32)$$

Аналогічно для взаємодуктивності між b' і c з урахуванням того, що $b' = b$:

$$M_{b'c} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sin\varphi \left[\chi_{2_{b'c}} \operatorname{arth}\left(\frac{b}{D_{22_{b'c}} + D_{21_{b'c}}}\right) + \gamma_{2_{b'c}} \operatorname{arth}\left(\frac{c}{D_{22_{b'c}} + D_{12_{b'c}}}\right) - \chi_{1_{b'c}} \operatorname{arth}\left(\frac{b}{D_{11_{b'c}} + D_{12_{b'c}}}\right) - \gamma_{1_{b'c}} \operatorname{arth}\left(\frac{c}{D_{11_{b'c}} + D_{21_{b'c}}}\right) + \frac{h+b_1}{\cos\varphi} A_{b'c} \right], \quad (33)$$

де $\chi_{2_{b'c}}$ – відстань далекого кінця відрізка до загального перпендикуляра з b' ; $\gamma_{2_{b'c}}$ – відстань далекого кінця відрізка b' до загального перпендикуляра з c ; $\chi_{1_{b'c}}$ – відстань ближнього кінця відрізка до загального перпендикуляра з b' ; $\gamma_{1_{b'c}}$ – відстань ближнього кінця відрізка b' до загального перпендикуляра з c ; $D_{11_{b'c}}$ – відстань між ближніми кінцями відрізків b' і c ; $D_{12_{b'c}}$ – відстань між ближнім кінцем відрізка з далеким кінцем відрізка b' ; $D_{21_{b'c}}$ – відстань між ближнім кінцем відрізка b' і далеким кінцем відрізка c ; $D_{22_{b'c}}$ – відстань між дальніми кінцями відрізків b' і c ; $A_{b'c}$ – коефіцієнт впливу зазору $h+b_1$.

Перелічені величини перебувають за формулами (34-42):

$$D_{11_{b'c}} = \sqrt{\left(x - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + (h+b_1)^2; \quad (34)$$

$$D_{12_{b'c}} = \sqrt{\left(x + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + (h+b_1)^2; \quad (35)$$

$$D_{21_{b'c}} = \sqrt{\left(c - x + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + (h+b_1)^2; \quad (36)$$

$$D_{22_{b'c}} = \sqrt{\left(c - x - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \sin\varphi\right)^2} + (h+b_1)^2; \quad (37)$$

$$k_{b'c}^2 = D_{12_{b'c}}^2 + D_{21_{b'c}}^2 + D_{11_{b'c}}^2 - D_{22_{b'c}}^2; \quad (38)$$

$$\chi_{1_{b'c}} = \frac{2b^2(D_{21_{b'c}}^2 - D_{11_{b'c}}^2 - c^2) + k_{b'c}^2(D_{12_{b'c}}^2 - D_{11_{b'c}}^2 - b^2)}{4c^2b^2 - k_{b'c}^4} c; \quad (39)$$

$$\gamma_{1_{b'c}} = \frac{2c^2(D_{12_{b'c}}^2 - D_{11_{b'c}}^2 - b^2) + k_{b'c}^2(D_{21_{b'c}}^2 - D_{11_{b'c}}^2 - c^2)}{4c^2b^2 - k_{b'c}^4} c; \quad (40)$$

$$\chi_{2_{b'c}} = \chi_{1_{b'c}} + c, \quad \gamma_{2_{b'c}} = \gamma_{1_{b'c}} + b; \quad (41)$$

$$A_{b'c} = \arctg \left[\frac{\chi_{1b'c} + \gamma_{1b'c} + D_{11b'c}}{h + b_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] +$$

$$+ \arctg \left[\frac{\chi_{2b'c} + \gamma_{2b'c} + D_{22b'c}}{h + b_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] -$$

$$- \arctg \left[\frac{\chi_{1b'c} + \gamma_{2b'c} + D_{12b'c}}{h + b_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] -$$

$$- \arctg \left[\frac{\chi_{2b'c} + \gamma_{1b'c} + D_{21b'c}}{h + b_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right]. \quad (42)$$

Отримані аналітичні вирази (2-42) дозволяють визначити функцію геометричних параметрів ВСП та координат:

$$u = \frac{U}{U_{\max}} = \frac{(M_{12} \cdot M_{23})}{(M_{12} \cdot M_{23})_{\max}} = f(a, b, c, a_1, b_1, x, y, h, \varphi), \quad (43)$$

де u – нормована амплітуда сигналу ВСП, виходячи з (1); a, b, c, a_1, b_1 – геометричні параметри ВСП та дефекту; x, y, h, φ – координати ВСП відносно дефекту (рис. 1).

Для узагальненого дослідження залежностей вихідного сигналу ВСП було обрано поодинокі відрізки, пропорційні розмірам обмоток ВСП. Розрахунок моделі та побудова залежностей здійснювалися із застосуванням програмних продуктів MS EXCEL, MATLAB, Advanced Grapher.

Аналіз отриманих аналітичних виразів показує, що особливістю ВСП [4] є залежність корисного сигналу від кута між дефектом і збудливою обмоткою. Це дозволяє ідентифікувати орієнтацію протяжної тріщини. На рис. 2-4 наведено результати моделювання залежності сигналу від φ для різних довжин дефекту, зазору та співвідношення розмірів обмоток ВСП.

Встановлено наявність усунення максимуму сигналу при різних співвідношеннях розмірів збуджуючої та вимірювальної обмоток ВСП (рис. 4). Це дає можливість коригувати діаграму спрямованості ВСП.

На рис. 5 наведено залежність сигналу ВСП від довжини тріщини d при різних зазорах h . Видно, що при великих тріщин сигнал ВСП мало залежить від їх довжини, проте зі збільшенням зазору чутливість до розміру тріщини збільшується. Залежність нормованої амплітуди сигналу від зазору представлена на рис. 6.

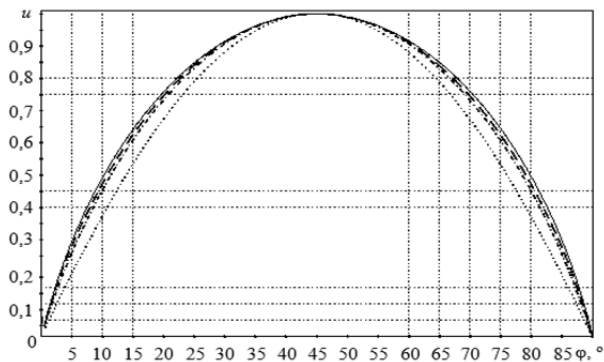


Рис. 2. Залежність нормованої амплітуди u від кута φ при різних довжинах дефекту (— $c=1$; -- $c>10$; -·-· $c=0,5$; ····· $c=0,1$)

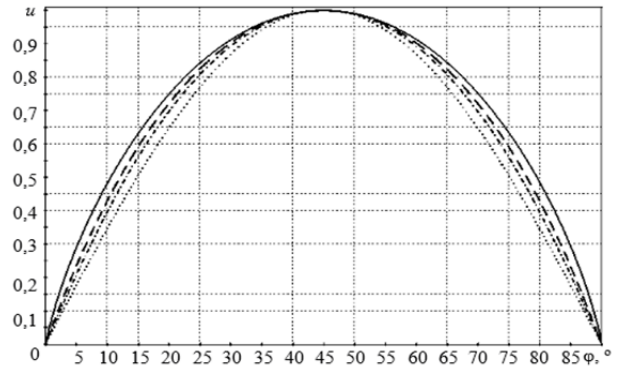


Рис. 3. Залежність нормованої амплітуди u від кута φ при різних зазорах (— $h=0$; -- $h=0,05$; -·-· $h=0,1$; ····· $h=0,5$)

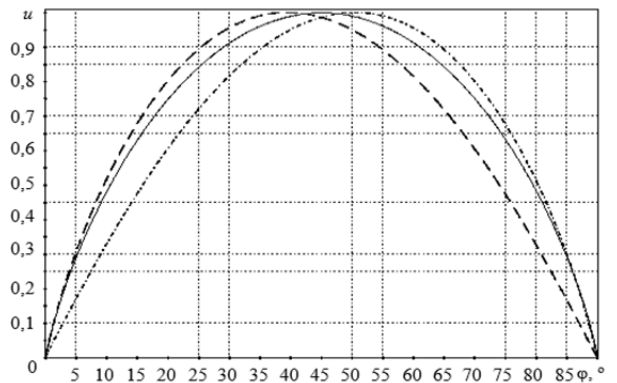


Рис. 4. Залежність нормованої амплітуди u від кута φ при різних відношеннях довжин обмоток ВСП (— $a/b=1$; -- $a/b=10$; -·-· $a/b=0,1$)

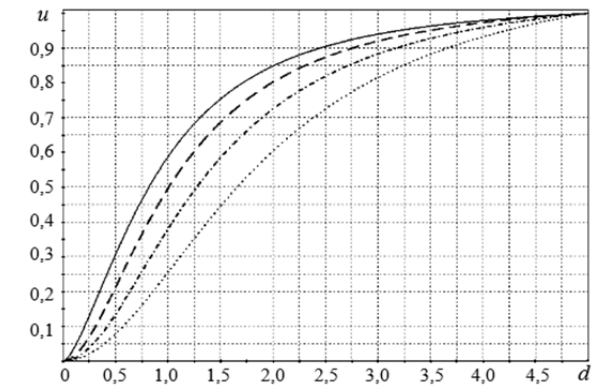


Рис. 5. Залежність нормованої амплітуди u від довжини тріщини d при різних зазорах (— $h=0$; -- $h=0,1$; -·-· $h=0,25$; ····· $h=0,5$)

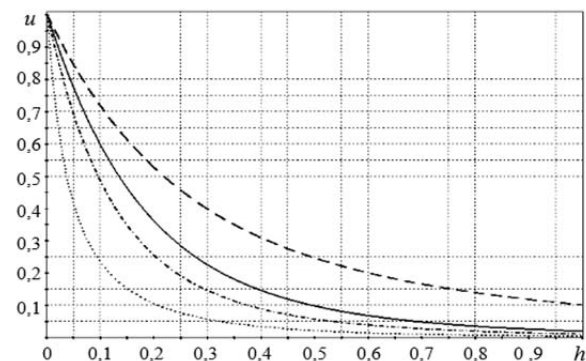


Рис. 6. Залежність нормованої амплітуди u від зазору h за різних довжинах тріщини (— $c=1$; -- $c=10$; -·-· $c=0,5$; ····· $c=0,1$)

З аналізу даних наведених на рис. 6 слід, що чутливість до впливу проміжку більш істотна для коротких тріщин.

Для оцінки впливу зазору за різних розмірів a_1, b_1 (див. рис. 1) ділянок обмоток ВСП отримані залежності, представлені на рис. 7–8. При невеликих зазорах вибір розмірів a_1, b_1 не критичний, проте сигнал ВСП монотонно збільшується зі збільшенням a_1 і b_1 пропорційно зазору. Тобто зазначені розміри необхідно вибирати з урахуванням можливих робочих зазорів або товщини неелектропровідних покриттів.

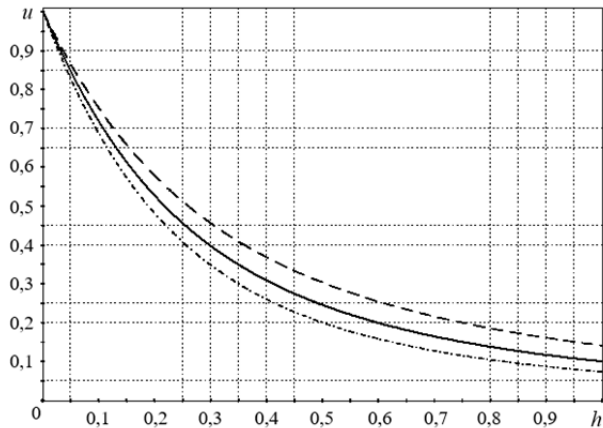


Рис. 7. Залежність нормованої амплітуди u від зазору h при різних довжинах обмоток ВСП (— $a_1=b_1=1$; --- $a_1=b_1=2$; -·-·- $a_1=b_1=0,5$)

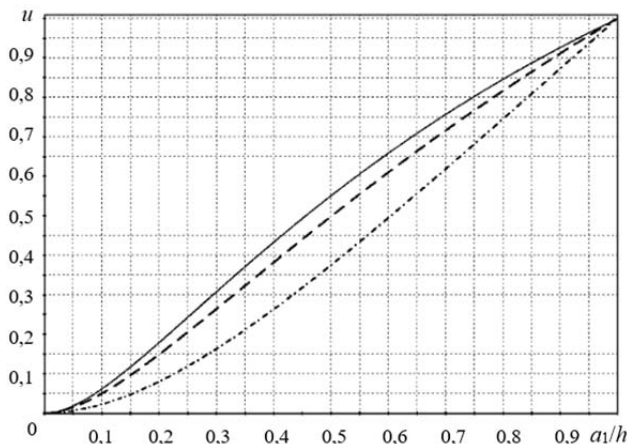


Рис. 8. Залежність нормованої амплітуди u від відношення a_1/h при різних зазорах (— $h=1$; --- $h=0,5$; -·-·- $h=0,1$)

Залежність амплітуди сигналу ВСП від переміщення вздовж короткого і довгого дефектів наведено на рис. 9. Точки перегину графіків відповідають краю дефектів. У разі збільшення зазору чутливість до переміщення поблизу краю дефекту зменшується.

На рис. 10–11 представлені залежності корисного сигналу ВСП від відносного переміщення x/c (0 відповідає середині дефекту, 0,5 – краю) для тріщин різної довжини. Чутливість до переміщення поблизу краю дефектів пропорційна їх розмірам, тобто для протяжних дефектів можливе більш точне визначення меж при скануванні.

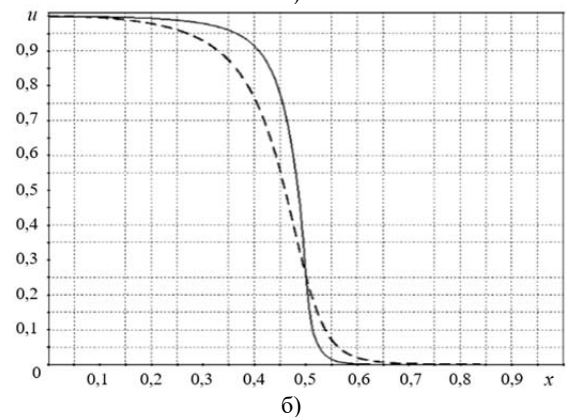
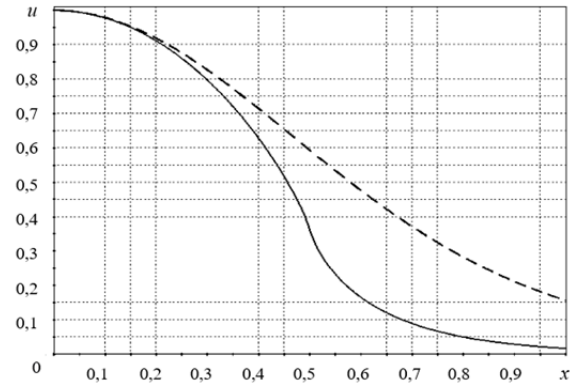


Рис. 9. Залежність u від переміщення x вздовж тріщини c за різних зазорах (— $h=0$; --- $h=0,5$): а) $c=1$; б) $c=10$

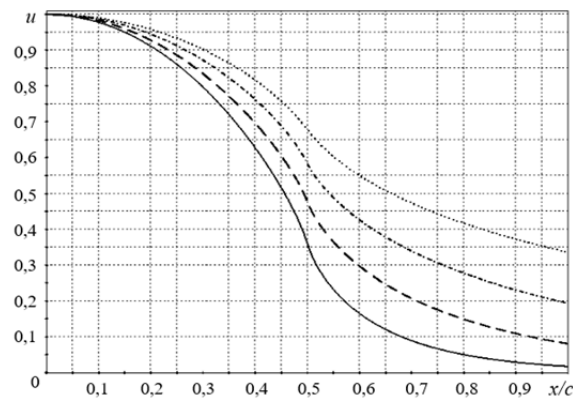


Рис. 10. Залежність u від відношення x/c ра різних довжинах тріщини — $c=1$; --- $c=0,5$; -·-·- $c=0,25$; ····· $c=0,1$

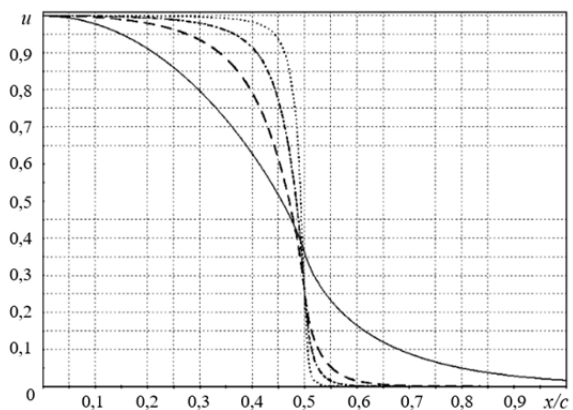


Рис. 11. Залежність u від відношення x/c за різних довжинах тріщини — $c=1$; --- $c=5$; -·-·- $c=10$; ····· $c=25$

Для визначення сигналу при переміщенні ВСП від середини дефекту вздовж Y розраховані залежності різних розмірів тріщин (рис. 12) і зазорів (рис. 13).

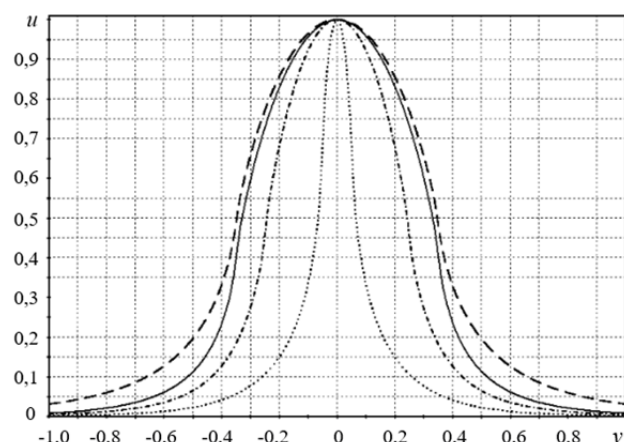


Рис. 12. Залежність u від координати y за різних довжинах тріщини— $c=1$; $-- c>10$; $- \cdot - c=0,5$; $\cdots c=0,1$

Для розглянутої моделі отримані просторові розподілу сигналу ВСП при скануванні зразка з поверхневою тріщиною, рис. 14.

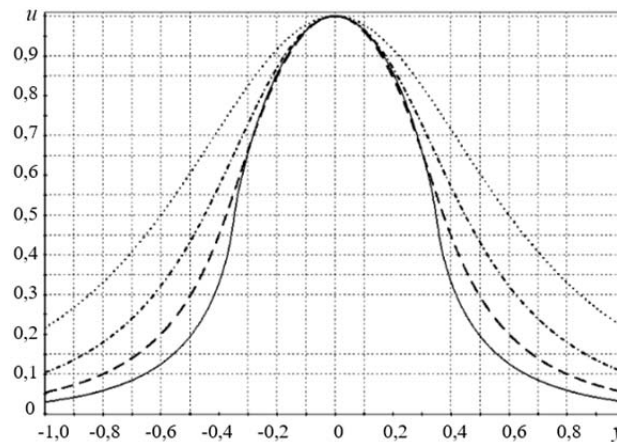


Рис. 13. Залежність u від координати y різних зазорах — $h=0$; $-- h=0,1$; $- \cdot - h=0,25$; $\cdots h=0,5$

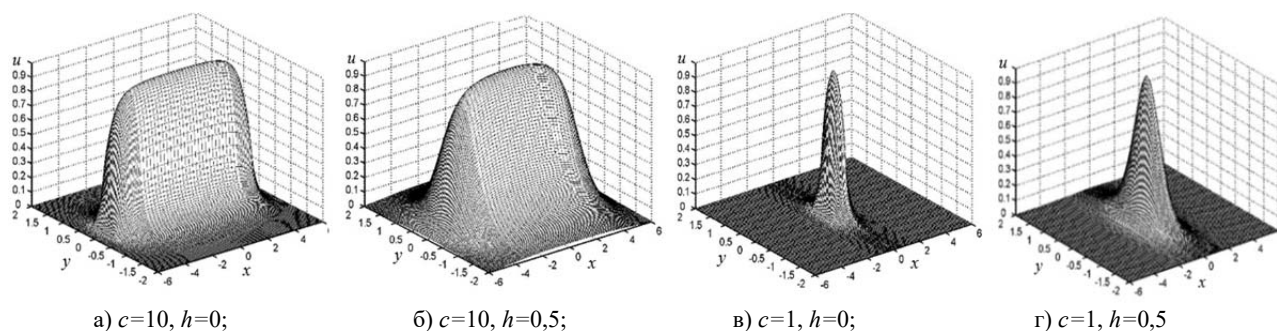


Рис. 14. Просторовий розподіл сигналу ВСП

3. Висновки

У цій роботі отримані аналітичні залежності сигналів ВСП від конструктивних та просторових параметрів, що дозволяють розширити уявлення про закономірності роботи ортогонального вихорострумowego перетворювача. За допомогою розробленої моделі встановлено, що сигнал ВСП має максимум при $\pm 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$, а форма залежності визначається величиною дефекту і зазору. При різних співвідношеннях розмірів збуджуючої та вимірювальної обмоток ВСП спостерігається усунення максимуму сигналу до $\pm 10^\circ$. Показано, що для великих тріщин сигнал ВСП мало залежить від їх довжини, проте зі збільшенням

зазору чутливість до розміру тріщини збільшується, а чутливість до зазору впливу істотна для коротких тріщин. При невеликих робочих зазорах вибір розмірів a_1, b_1 не є критичним, проте сигнал ВСП монотонно збільшується при збільшенні a_1 і b_1 пропорційно зазору. У разі збільшення зазору чутливість до переміщення ВСП поблизу краю дефекту зменшується. Досліджена модель дозволяє знаходити просторові розподіли сигналу ВСП під час сканування зразка з поверхневою тріщиною. Використовуючи результати цієї роботи можна здійснити вибір параметрів ортогонального ВСП для вирішення конкретних завдань вихорострумовой дефектоскопії.

Список літератури

1. Білокур І. П. Основи дефектоскопії: підручник., Нац. авіац. ун-т. К. : Азимут-Україна, 2004. 496 с.
2. Meyendorf, N., Idell, Y., Singh, A., Mazumder, P., eds. Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0. Cham: Springer, 2025. 1800 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-84477-5>
3. Хомяк Ю.В., Гонтар В. Ю. Розподіл електромагнітного поля поверхневого дефекта в металевому виробі. *Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування*. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції. 2017. С. 115–116.
4. Сучков Г.М., Хомяк Ю.В. Патент на корисну модель № 55471 UA, МПК G01N 27/90. Накладний вихорострумовой перетворювач для неруйнівного контролю, заяв. 05.07.2010; опубл. 10.12.2010.
5. Хомяк Ю.В. Фізична модель впливу тонкої поверхневої тріщини металевого зразка на накладний вихорострумовой перетворювач. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Анотації доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції. НТУ «ХПІ», 2009. С. 529.

6. Іващенко Є.Д., Носков М.С., Хомяк Ю. В. Моделювання корозійного дефекту сталевий штирпеси. «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»: матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 168.
7. Хомяк Ю.В., Іващенко Є.Д. Порівняння сигналів вихрострумів перетворювачів різної конфігурації. Автоматизація, електроніка, інформаційно-вимірювальні технології: освіта, наука, практика: матеріали V Міжнарод. наук.-техн. Конфер Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 10.
8. Іващенко Є.Д., Хомяк Ю.В. Моделювання вихрових струмів у ферромагнітному зразку з урахуванням кривої намагнічування. «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»: матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів конференції. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 166
9. Grover F. W. Inductance Calculations: Working Formulas and Tables. New York : Dover Publications, 2004. 320 p.

Надійшла (Received) 05.09.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 20.09.2025

Відомості про авторів / About the authors

Хомяк Юрій – Кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: Yurii.Khomiak@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6998-8393>

Khomiak Yurii – PhD, Associate Professor, Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», E-mail: Yurii.Khomiak@kphi.edu.ua, Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6998-8393>

Дроздова Тетяна – Кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: Tetiana.Drozdova@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7315-5869>

Drozdova Tetiana – PhD, Associate Professor, Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», e-mail: Tetiana.Drozdova@kphi.edu.ua, Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7315-5869>

Корнєв Іван – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: Ivan.Korniev@infiz.kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8106-1757>

Korniev Ivan – PhD student, Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», e-mail: Ivan.Korniev@infiz.kphi.edu.ua, Number ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8106-1757>

Носков Микита – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: Mykyta.Noskov@infiz.kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2299-1418>

Noskov Mykyta – PhD student, Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», e-mail: Mykyta.Noskov@infiz.kphi.edu.ua, Number ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2299-1418>

Mathematical modeling of a layered orthogonal eddy current conversion

Y.V. Khomyak, T.V. Drozdova, I.K. Korniev, M. S. Noskov

Abstract

The article presents the results of a theoretical study of the interaction between an eddy current probe (ECP) and a ferromagnetic specimen containing a surface crack. The relevance of the study stems from the need to improve the reliability and selectivity of eddy current nondestructive testing of metallic components, particularly in cases where conventional ECPs exhibit low resistance to variations in lift-off distance, magnetic permeability, and electrical conductivity of the test object. To address these limitations, the authors have developed an orthogonal eddy current probe that provides spatial separation of the excitation and signal detection functions. A mathematical model of the ECP–crack interaction is proposed, taking into account the surface nature of eddy currents and their orientation along the defect. In the model, the probe coils are represented as idealized conductors, enabling an analytical description of the influence of geometric parameters of both the ECP and the specimen on the output signal. The obtained analytical relationships describe the dependence of the signal amplitude on the probe's angular position, crack size, lift-off distance between the ECP and the specimen surface, as well as on the ratio of the excitation and sensing coil dimensions.

Key words: eddy current probe, sensing coil, defect, ferromagnet, mathematical modeling, crack, inspection, electromagnetic permeability, geometric parameters.

КВАЛІМЕТРІЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ / QUALIMETRY AND QUALITY ASSURANCE

УДК 681.625.92

DOI: 10.30837/2663-9564.2025.2.10

ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ЗАДОВОЛЕННЯ ВИМОГ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЯКІСТЮ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ В УНІВЕРСИТЕТАХ УКРАЇНИ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ QFD

І.О. Мощенко, О.В. Запорожець

¹*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

Анотація

Як доводять результати опитування здобувачів вищої освіти, наявність якісного навчально-методичного забезпечення (НМЗ), є однією з найважливіших складових загальної якості освітнього процесу. Особливого значення наявність зрозумілого, сучасного, відповідного положенням освітньої програми НМЗ набуває в умовах он-лайн навчання під час воєнного стану в Україні, коли не завжди у здобувачів є можливість безпосереднього спілкування з викладачем в потрібний для цього час. Тому споживчі характеристики НМЗ, які реалізуються через функціональні вимоги, потребують ретельного дослідження, виділення окремих складових та аналізу ступеню їх важливості саме для здобувачів вищої освіти та стейкхолдерів освітнього процесу. Метою дослідження є розробка алгоритму аналізу споживчих запитів здобувачів вищої освіти якістю НМЗ на основі методу розгортання функції якості (QFD) та пріоритизація функціональних характеристик НМЗ з метою підвищення задоволеності споживачів освітніх послуг в українських університетах. Методологія дослідження базується на застосуванні методу QFD. Статистична обробка результатів дослідження здійснена з використанням методів розрахунку коефіцієнту Альфа Кронбаха, дисперсійного аналізу, кореляційного аналізу, методу Парето. В результаті дослідження сформовано алгоритм застосування методу QFD для підвищення якості надання освітніх послуг, який враховує специфічні особливості сучасного освітнього середовища в Україні. Комплекс розроблених споживчих та функціональних характеристик НМЗ з визначеними ваговими коефіцієнтами може бути застосований для підвищення задоволеності споживачів освітніх послуг якістю НМЗ, які отримують освіту за галуззю знань G Інженерія, виробництво та будівництво, а загальний алгоритм – для покращення якості освітніх послуг в усіх університетах України.

Ключові слова: розгортання функції якості, адаптований алгоритм, статистичний аналіз, кореляційний аналіз, статистична обробка результатів, функціональні вимоги.

1. Вступ

Принципи забезпечення якості освітнього процесу в закладах вищої освіти (ЗВО) базуються на настановах міжнародних стандартів, які впроваджено в Україні в якості національних, а саме: ДСТУ ISO 21001:2019 Освітні організації. Системи управління в освітніх організаціях. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 21001:2018, IDT), ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT) та нормативному документі Стандарти і рекомендації щодо забезпечення якості в Європейському просторі вищої освіти (ESG). Чинні версії цих нормативних документів рекомендують поряд із традиційними методами забезпечення якості освітньо-наукових процесів на основі моделі Total Quality Management (TQM) застосовувати широкий інструментарій сучасних моделей управління якістю, які раніше вважались суто виробничоорієнтованими (методологія управління якістю Lean Six Sigma (LSS)). Гібридна методологія LSS містить в своєму арсеналі велику кількість практично скерованих сучасних інструментів управління якістю, які зосереджені на задоволенні вимог споживачів при

мінімальній витраті ресурсів, що набуває особливої актуальності в умовах економії ресурсів під час воєнного стану в Україні.

Одним з найбільш ефективних інструментів LSS є метод Розгортання Функції Якості або Quality Function Deployment (QFD), який дозволяє трансформувати запити та побажання споживачів в функціональні вимоги (ФВ) до освітніх послуг та продуктів в ЗВО. Скерованість процесу забезпечення якості саме на пріоритетних ФВ допомагає досягти цільових показників якості без витрати ресурсів на не дуже важливі споживчі властивості освітніх процесів для здобувачів вищої освіти.

Технологія QFD є дуже відомою та популярною в сфері управління якістю і широко застосовується з метою аналізу споживчих запитів в сфері освіти, що підтверджується наявністю великої кількості досліджень науковців у всьому світі. Але переважна кількість праць зосереджена саме на дослідженні загальної задоволеності здобувачів освіти без конкретизації окремих ключових процесів освітньо-наукової діяльності ЗВО та орієнтується на освітні умови певних країн, які суттєво відрізняються від українських реалій. Тому важливою задачею є аналіз

якості ключових процесів діяльності ЗВО з урахуванням особливостей нормативно-правової організації освітнього процесу та реальних умов навчання здобувачів в сучасному українському освітньому середовищі.

Особливої актуальності набуває аналіз якості навчально-методичного забезпечення (НМЗ) освітнього процесу в Україні через складні умови організації навчання в умовах воєнного стану, що підкреслюється в Законі України «Про внесення змін до Закону України «Про освіту» щодо вдосконалення науково-методичного забезпечення освіти та якості навчальної літератури» від 2023 року.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вважається, що вперше запропонував застосовувати метод QFD для покращення якості надання освітніх послуг М.Клейтон. Його дослідження отримали прикладне впровадження в Aston University, England в рамках впровадження комплексної моделі управління якістю TQM [1]. Подальші розвідки науковців скеровані на дослідженні загальної задоволеності споживачів освітніх послуг якістю освітнього процесу [2-4].

Наступним кроком в розвитку засад використання QFD в ЗВО стали дослідження, скеровані на підвищення якості окремих процесів діяльності ЗВО. Згідно з принципами процесного підходу питання покращення ключових процесів діяльності ЗВО проаналізовано в ряді наукових публікацій [6,7], тощо. Цікавість викликає фундаментальне порівняльне оглядове дослідження наукових публікацій концепцій методу QFD [8].

В дослідженнях 2020-х років увага науковців сконцентрована на аналізі запитів споживачів освітніх послуг в умовах он-лайн навчання у зв'язку з пандемією COVID-19 [9,10]

Окремої уваги заслуговують дослідження, присвячені розробці та покращенню навчальних планів в ЗВО [11-13]. Але в цих роботах акцент робиться на вивчення задоволеності здобувачів та стейкхолдерів саме переліком набутих компетентностей та дисциплін, що вивчаються, для окремої спеціальності. Важливим аспектом покращення надання освітніх послуг для всіх стейкхолдерів, а саме: здобувачів вищої освіти, їх батьків, науково-педагогічного персоналу (НПП), роботодавців та суспільства взагалі, є аналіз споживчих характеристик НМЗ процесу засвоєння фахових знань та умінь, що і є необхідною умовою ефективного набуття здобувачами затребуваних стейкхолдерами компетентностей.

В Україні публікації, присвячені дослідженню особливостей застосування QFD в ЗВО, відсутні, хоча саме зараз в умовах переважного он-лайн навчання в багатьох провідних ЗВО України, НМЗ освітнього процесу набуває особливого значення, оскільки здобувачі вищої освіти не завжди мають

можливість за потребою спілкуватись особисто з викладачем. Тому важливою прикладною задачею є як дослідження загальної задоволеності споживачів освітніх послуг в складних сучасних умовах українського освітнього середовища з метою покращення результатів навчання та набуття фахових компетентностей для подальшої професійної реалізації здобувачів вищої освіти, так і більш конкретне завдання – дослідження споживчих характеристик ключового процесу діяльності ЗВО «Розробка НМЗ освітнього процесу», виокремленого в роботі [14], оскільки саме цей процес має суттєву специфіку в Україні, порівняно з закордонними умовами, через особливості нормативно-методологічної бази, освітні традиції українських ЗВО та ускладнені умови функціонування ЗВО в умовах воєнного стану.

3. Мета статті

Метою дослідження є аналіз споживчих запитів здобувачів ЗВО до НМЗ освітнього процесу за допомогою методу QFD; ідентифікація функціональних характеристик процесу розробки НМЗ, враховуючи особливості українського освітнього середовища, які максимально задовольняють вимоги здобувачів вищої освіти та враховують запити стейкхолдерів; розробка заходів наближення функціональних характеристик НМЗ до цільових значень. Отримані результати дослідження можна буде використовувати під час покращення процесу розробки НМЗ для здобувачів ЗВО галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво. А процедурним результатом дослідження повинна стати розробка прикладного алгоритму дій для встановлення функціональних характеристик комплексу НМЗ (КНМЗ) здобувачів ЗВО різних галузей знань, який враховує специфіку необхідних фахових компетентностей.

4. Методологія

Метод QFD як виробничоорієнтований інструмент трансформації запитів споживачів в технічні характеристики продукту був розроблений в 1960-х роках в Японії. Хоча вважається, що метод QFD розроблений в рамках методології управління якістю TQM, про що свідчить перша публікація Mizuno & Akae, 1978 року, присвячена цьому методу, «An Approach to Total Quality Control» added to «Quality Function Deployment», але офіційна належність методу QFD до інструментарію саме методології LSS, підтверджується виданням міжнародного стандарту ISO 13053-2:2011 Quantitative methods in process improvement Six Sigma - Part 2: Tools and techniques, в якому задокументовано умови та алгоритм застосування методу QFD з метою визначення голосу споживачів на етапі Define циклу DMAIC [15], а перший стандарт, присвячений методу QFD, а саме ISO 16355-1:2015 Application of statistical and related methods to new technology and product

development process — Part 1: General principles and perspectives of Quality Function Deployment (QFD) (чинна версія стандарту ISO 16355-1:2021), був виданий тільки 2015 року [16].

QFD отримав широке застосування для аналізу споживчих запитів у сфері освітніх послуг внаслідок його гнучкості, універсальності, наочності та простоти застосування.

Офіційне визначення методу QFD, наведене в міжнародному стандарті ISO 16355-1:2021, носить загальний характер: «Quality Function Deployment QFD – це управління всіма організаційними функціями та процесами для забезпечення якості продукту» [16]. Технологією реалізації методу QFD є House of Quality (HoQ), який представляє собою кореляційну матрицю якості, яка пов'язує між собою споживчі та технічні характеристики об'єкта дослідження, враховуючи всі зацікавлені сторони введенням вагових коефіцієнтів.

Розроблено програмні сервіси, які дозволяють автоматизувати побудову HoQ. Найбільшої популярності набули спеціалізовані програмні продукти QFD Designer та Qualica, а також універсальні програмні сервіси для побудови діаграм та матриць EdrawMax, Creately, і SmartDraw, які дозволяють опосередкованим чином будувати HoQ. Але проблема отримання якісних, актуальних та узгоджених вхідних даних, а також врахування всіх можливих впливів на результати застосування методу є технічним викликом до QFD-програмного забезпечення.

Алгоритм реалізації QFD на етапі планування ФВ об'єкта дослідження складається з наступних етапів:

- 1) Почути голос споживача (ГС).
- 2) Статистична обробка результатів за допомогою дисперсійного аналізу ANOVA (Analysis of Variance).
- 3) Визначення функціональних вимог (ФВ).
- 4) Розрахунок кореляційної матриці зв'язку ГС та ФВ.
- 5) Розрахунок однофакторної кореляційної матриці ФВ.
- 6) Побудова HoQ.
- 7) Розрахунок та пріоритизація ФВ.
- 8) Впровадження корегуючих заходів.

Ранжування ФВ за пріоритетністю реалізації відбувається на основі розрахунку абсолютних та відносних значень пріоритетів технічних рішень, які враховують коефіцієнт взаємозв'язку і-того ГС та j-того ФВ, вагові коефіцієнти ГС, та вагові коефіцієнти, які характеризують складність реалізації ФВ або важливість реалізації ФВ з точки зору конкурентоздатності. Врахування особливостей освітньо-наукових процесів в ЗВО вимагає корегування класичної формули розрахунку [16] шляхом введення коефіцієнту важливості реалізації ФВ для стейкхолдерів (Голос стейкхолдера (ГСт)):

$$I_j = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot H_{ij} \cdot S_j); \quad (1)$$

де I_j - абсолютна важливість j-тої ФВ, n - кількість ГС, P_i - вагові коефіцієнти і-того ГС, H_{ij} - коефіцієнти взаємозв'язку і-того ГС та j-тої ФВ, S_j - вагові коефіцієнти ГСт j-тої ФВ.

Відповідно, до традиційного алгоритму QFD додано етап визначення важливості ФВ для стейкхолдерів – «Почути ГСт».

На етапі «Почути ГС» для формування комплексу характеристик, що визначають задоволеність здобувачів вищої освіти якістю НМЗ навчальних дисциплін, використовувалась методика HedPerf (Higher Education Performance) і нормативні вимоги до якості навчальної літератури як освітнього продукту [17].

Для аналізу результатів опитування застосовувався дисперсійний аналіз ANOVA та метод розрахунку коефіцієнту узгодженості Альфа Кронбаха.

Для аналізу взаємозв'язків між характеристиками застосовувався метод кореляційного аналізу.

Для ранжування ФВ за пріоритетністю був використаний метод діаграми Парето.

5. Результати

Переважає більшість наукових та прикладних досліджень, що стосуються підвищення задоволеності споживачів освітньо-наукового продукту, скеровані на поліпшенні рівня задоволеності загальним освітнім процесом в ЗВО. Під час визначення ключових споживчих характеристик освітнього процесу акцент робиться саме на загальне сприйняття здобувачами рівня якості освітніх послуг. І дуже опосередковано враховуються питання, присвячені такому важливому ключовому процесу діяльності ЗВО як процес розробки НМЗ. Тому застосування методу QFD для підвищення рівня задоволеності споживачів освітніх послуг в рамках впровадження комплексної моделі управління якістю LSS [14, 18, 19] є важливим практичним завданням управління якістю ЗВО.

Пріоритизація ФВ КНМЗ як результату ключового процесу діяльності ЗВО «Розробка НМЗ освітнього процесу» з метою максимального задоволення запитів здобувачів ЗВО та з урахуванням потреб стейкхолдерів здійснена за адаптованим авторами алгоритмом QFD.

1) Почути ГС.

Оскільки розробка та впровадження в навчальний процес НМЗ є одночасно сукупністю розробки освітньо-наукового продукту та надання освітньої послуги, то для розробки переліку характеристик ГС використовувались як методики визначення ключових споживчих характеристик послуг в сфері освіти (ServQual, ServPerf, HEdPerf), так і загальні сучасні підходи до оцінювання якості навчальної літератури як освітнього продукту. В результаті дослідження, проведеного сумісно

викладачами та здобувачами освіти кафедри інформаційно-вимірювальних технологій (ІВТ), Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), виокремлено 18 ключових характеристик ГС якості КНМЗ як базового і обов'язкового компоненту НМЗ навчальних дисциплін в ЗВО:

1) Прозорість і зрозумілість критеріїв оцінювання знань студентів (ГС1).

2) Зрозумілість змісту та результатів навчання (ГС2).

3) Чіткість, грамотність та доступність подання матеріалу в КНМЗ (ГС3).

4) Відповідність часу, необхідного для засвоєння матеріалів та окремих тем (ГС4).

5) Відповідність змісту освітньої програми (ОП) (ГС5).

6) Відповідність тем практичних та лабораторних занять лекційному матеріалу (ГС6).

7) Рівномірність розподілу матеріалу між темами (ГС7).

8) Висвітлення сучасних наукових та прикладних досліджень (ГС8).

9) Наявність КНМЗ у вільному доступі в електронній бібліотеці до початку курсу (ГС9).

10) Наочність та структурованість подання матеріалів (ГС10).

11) Актуалізація змісту тем з урахуванням вимог галузі (ГС11).

12) Практична спрямованість подачі матеріалу з наведенням та тлумаченням практичних прикладів (ГС12).

13) Структурованість завдань за рівнем складності (ГС13).

14) Логічні взаємозв'язки між темами (ГС14).

15) Гнучка організація подачі матеріалу (ГС15).

16) Наявність методичних рекомендацій для виконання практичних та лабораторних завдань (ГС16).

17) Наявність переліку додаткових літературних та нормативних джерел для поглибленого вивчення тем (ГС17).

18) Комплексний підхід з інтеграцією суміжних дисциплін (ГС18).

Здобувачі освітніх послуг кафедри ІВТ оцінювали важливість характеристик ГС за шкалою Лайкерта (від 1 – найменш важлива до 5 – найбільш важлива), а також оцінювали якість КНМЗ за кваліметричною шкалою (від 1 – зовсім неякісно до 10 – дуже якісно).

2) Статистична обробка результатів за допомогою дисперсійного аналізу ANOVA.

Для підтвердження властивості сформованих характеристик ГС якості КНМЗ забезпечувати стійкі та достовірні реакції здобувачів під час майбутніх опитувань був використаний метод розрахунку коефіцієнту Альфа Кронбаха, який вважається найбільш ефективним під час визначення надійності оцінки важливості окремих аспектів базового

фактору. Процедура обчислень полягає в знаходженні дисперсії всіх індивідуальних бальних оцінок за кожним завданням із подальшим підсумовуванням цих дисперсій за всіма завданнями. Повна формула коефіцієнта Альфа Кронбаха має такий вигляд:

$$\alpha_c = \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k (SD_i^2)}{SD_i^2} \right), \quad (2)$$

де SD_i – стандартне відхилення сумарних показників опитувальника; $\sum_{i=1}^k (SD_i^2)$ – сума дисперсій бальних оцінок за кожним питанням опитувальника; k – кількість питань у опитувальнику.

У загальному вигляді, коефіцієнт Кронбаха визначається як оцінка кореляції даного опитувальника з іншим опитувальником такої самої довжини з однієї генеральної сукупності завдань. З формули коефіцієнта Кронбаха можна зробити висновок, що надійні опитувальники мають більшу дисперсію бальних оцінок за кожним завданням опитувальника (і, отже, є більш дискримінативними), ніж ненадійні опитувальники. Саме Альфа Кронбаха як показник надійності обчислюється та публікується для тестів національного мультипредметного тестування (НМТ) в Україні.

Результати визначення Альфа Кронбаха розробленого комплексу ГС КНМЗ за допомогою дисперсійного аналізу ANOVA наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Двофакторний дисперсійний аналіз без реплікацій ANOVA ГС (значущість $\alpha = 0,01$)

Характеристики ГС	Середнє	Дисперсія
ГС1	3,571429	0,285714
ГС2	3,714286	0,571429
ГС3	4,571429	0,285714
ГС4	2,714286	0,238095
ГС5	4,428571	0,285714
ГС6	3,571429	0,285714
ГС7	2,285714	0,571429
ГС8	4,285714	0,571429
ГС9	4,571429	0,285714
ГС10	3,571429	0,285714
ГС11	3,714286	0,238095
ГС12	4,714286	0,238095
ГС13	2,571429	0,285714
ГС14	3,285714	0,238095
ГС15	4,428571	0,285714
ГС16	2,857143	0,142857
ГС17	3,571429	0,285714
ГС18	2,428571	0,285714

Джерело варіації	Сума квадратів (SS)	Mean Square (MS)	F	P-значення	Критерій Фішера F _{cr}
Рядки	74,159	4,3622	13,32	6,78E-19	1,7238
Стовбці	0,6032	0,1005	0,3070	0,9320	2,1887
Похибка	33,397	0,327			
Усього	108,16				
Альфа Кронбаха	0,9249				

Значення Альфа Кронбаха $0,92 \geq 0,9$ відповідає високому рівню внутрішньої узгодженості результатів опитування. Тому результати визначення важливості характеристик можна використовувати для подальшого QFD.

Нормовані вагові коефіцієнти характеристик ГС були визначені за результатами опитування та дисперсійного аналізу (табл. 1) та наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Нормовані вагові коефіцієнти характеристик ГС

Характеристики ГС	Нормовані вагові коефіцієнти
ГС1	0,055066
ГС2	0,057269
ГС3	0,070485
ГС4	0,04185
ГС5	0,068282
ГС6	0,055066
ГС7	0,035242
ГС8	0,066079
ГС9	0,070485
ГС10	0,055066
ГС11	0,057269
ГС12	0,072687
ГС13	0,039648
ГС14	0,050661
ГС15	0,068282
ГС16	0,044053
ГС17	0,055066
ГС18	0,037445

3) Визначення ФВ.

ФВ до КНМЗ, виконання яких дозволить максимально ефективно задовольнити ГС, розроблені з урахуванням нормативних видань «Рекомендації щодо застосування критеріїв оцінювання якості освітньої програми» (2020 р.), «Роз'яснення щодо застосування Критеріїв оцінювання якості освітньої програми: методичний посібник» (2024 р.) та внутрішнього документу ХНУРЕ «Положення про комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни»:

1) Відповідність обсягу матеріалу КНМЗ обсягу, передбаченому ОП (ФВ1).

2) Відповідність структури КНМЗ Навчальному плану та змісту ОП (ФВ2).

3) Забезпечення практичної підготовки здобувачів з метою набуття фахових компетентностей із врахуванням вимог стейкхолдерів із використанням прикладів практичної діяльності (ФВ3).

4) Відповідність форм та методів навчання, які використовуються в КНМЗ, вимогам студентоцентрованого підходу та принципам академічної свободи (ФВ4).

5) Наявність в КНМЗ зрозумілої інформації щодо цілей, змісту та програмних результатів навчання (ФВ5).

6) Відповідність змісту КНМЗ сучасним науковим досягненням та практикам (ФВ6).

7) Чіткість та зрозумілість форм контрольних заходів та критеріїв оцінювання (ФВ7).

8) Оформлення КНМЗ згідно з вимогам ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання» (ФВ8).

9) Відповідність часу розробки та оприлюднення КНМЗ вимогам Наказу ХНУРЕ № 170 від 02.06.2021 «Про норми часу для планування й обліку навчальної, методичної, наукової, організаційної роботи науково-педагогічних працівників ХНУРЕ» (ФВ9).

10) Доступність програмних засобів, необхідних для використання практичних та лабораторних робіт (ФВ10).

11) Наявність слайд-лекцій, структура яких відповідає вимогам документу «Положення про комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни» (ФВ11).

12) Оновлення змісту КНМЗ не рідше за 1 раз на 5 роки, а внесення коректив, які враховують новітні досягнення науки та практики, - кожного року (ФВ12).

4) Розрахунок кореляційної матриці зв'язку ГС та ФВ.

Для розрахунку матриці взаємозв'язку було проведено опитування 83 здобувачів кафедри ІВТ щодо оцінки ГС та 10 викладачів-експертів кафедри ІВТ щодо оцінки ФВ. Об'єктами оцінювання виступили 25 КНМЗ, впроваджених на кафедрі ІВТ. За результатами дослідження були розраховані коефіцієнти кореляції ГС та ФВ за формулою:

$$r_{xy} = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (x_i y_i) - \left(\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i \right)}{\sqrt{\left(N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right) \cdot \left(N \cdot \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right)}} \quad (3)$$

де x_i – ФВ і-того КНМЗ, y_i – ГС і-того КНМЗ, N – кількість КНМЗ, $N = 25$.

Граничне значення коефіцієнта кореляції Пірсона для $N = 25$ та рівня значущості $\alpha = 0,01$ становить $r_{xy cr} = 0,51$.

Результати розрахунку коефіцієнтів кореляції наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Кореляційна матриця ГС та ФВ
(наведено тільки результати зі статистично значущою кореляцією з рівнем значущості $\alpha = 0,01$)

	ФВ1	ФВ2	ФВ3	ФВ4	ФВ5	ФВ6	ФВ7	ФВ8	ФВ9	ФВ10	ФВ11	ФВ12
ГС1	0,53	0,55	-	0,58	0,86	-	0,92	-	-	-	-	-
ГС2	0,58	0,62	0,66	0,52	0,93	-	0,76	-	-	-	0,53	-
ГС3	-	0,53	0,64	0,84	0,78	-	-	0,57	-	-	0,76	-
ГС4	0,89	0,77	-	0,58	-	-	-	-	-	-	0,71	-
ГС5	0,89	0,84	-	-	0,56	-	0,61	-	-	-	-	0,52
ГС6	-	0,65	0,67	0,36	-	0,70	-	-	-	-	-	-
ГС7	0,67	0,56	-	0,59	-	-	-	-	-	-	-	-
ГС8	-	-	0,92	0,61	-	0,88	-	-	-	0,64	-	0,86
ГС9	-	-	-	0,68	-	-	-	-	0,93	-	-	0,67
ГС10	-	0,57	0,91	0,79	0,53	0,81	-	-	-	0,74	0,66	0,61
ГС11	-	0,52	0,90	0,56	0,55	0,87	-	-	-	0,77	-	0,84
ГС12	-	-	0,96	0,91	-	0,81	-	-	-	0,92	0,53	0,77
ГС13	-	0,56	-	0,87	0,69	-	0,53	-	-	-	-	-
ГС14	-	0,64	-	0,58	0,61	0,63	-	-	-	-	0,58	-
ГС15	-	-	0,58	0,87	-	-	-	-	-	0,75	0,69	-
ГС16	-	0,87	0,77	-	-	-	0,69	0,66	-	0,95	-	-
ГС17	-	0,85	-	0,84	-	0,62	-	-	-	0,56	-	0,66
ГС18	-	0,73	0,77	0,71	-	0,53	-	-	0,78	-	-	0,53

5) Розрахунок однофакторної кореляційної матриці ФВ.

Для встановлення цільових значень $ФВ_0$ необхідним є врахування наявності внутрішніх кореляційних зв'язків між всіма технічними

характеристиками КНМЗ ($ФВ_j$). За результатами експертного оцінювання 25 КНМЗ викладачами кафедри ІВТ було розраховано кореляційну матрицю за формулою (3) (табл. 4).

Таблиця 4 – Кореляційна матриця ФВ (наведено тільки результати зі статистично значущою кореляцією з рівнем значущості $\alpha = 0,01$)

ФВ1	ФВ2	ФВ3	ФВ4	ФВ5	ФВ6	ФВ7	ФВ8	ФВ9	ФВ10	ФВ11	ФВ12	
	0,62	-	-	-	-	-	0,52	-	-	-	-	
		ФВ2	-	-	0,66	0,58	-	-	-	0,78	-	
			ФВ3	0,77	-	0,84	-	-	-	-	0,81	
				ФВ4	-	0,69	-	-	0,64	0,57	-	
					ФВ5	-	0,66	0,59	-	-	-	
						ФВ6	-	-	-	-	0,87	
							ФВ7	0,59	-	-	-	
								ФВ8	-	-	-	
									ФВ9	-	-	
										ФВ10	-	
											ФВ11	
												0,61

6) Почути ГСт.

Думку стейкхолдерів ГСт було враховано розрахунком вагових коефіцієнтів ГСт для кожної функціональної характеристики КНМЗ, визначених за результатами експертного опитування 8 представників стейкхолдерів та статистично оброблених за методом ANOVA для розрахунків згідно з формулою (2).

Результати визначення Альфа Кронбаха ГСт КНМЗ за допомогою дисперсійного аналізу ANOVA наведено в таблиці 5.

Значення Альфа Кронбаха $0,97 \geq 0,9$ відповідає високому рівню внутрішньої узгодженості результатів опитування. Тому вагові коефіцієнти ГСт можна використовувати для подальшого розгортання функції якості.

Таблиця 5 – Двофакторний дисперсійний аналіз без реплікацій ANOVA ГСт (значущість $\alpha = 0,01$)

Характеристики ГСт	Середнє	Дисперсія
ГСт1	1,714286	0,571429
ГСт2	3,285714	0,571429
ГСт3	5	0
ГСт4	1,571429	0,619048
ГСт5	2,285714	0,571429
ГСт6	4,714286	0,238095
ГСт7	2,428571	0,285714
ГСт8	1,571429	0,285714
ГСт9	2,571429	0,619048
ГСт10	4,285714	0,571429
ГСт11	2,714286	0,238095
ГСт12	4,857143	0,142857

Джерело варіації	Сума квадратів (SS)	Mean Square (MS)	F	P-значення	Критерій Фішера Fcr
Рядки	132,13	12,01	32,42	2,17E-22	2,5290
Стовбці	3,8333	0,6389	1,72	0,1291	3,0883
Похибка	24,452	0,3705			
Усього	160,42				
Альфа Кронбаха	0,969				

7) Побудова House of Quality.

За результатами проведених досліджень і розрахунків будемо HoQ (рис.1).

Напрямок поліпшення (↑,0,↓)		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
I: низький, 5: високий	Функціональні вимоги (ФВ)	ФВ1	ФВ2	ФВ3	ФВ4	ФВ5	ФВ6	ФВ7	ФВ8	ФВ9	ФВ10	ФВ11	ФВ12
Ваговий коефіцієнт ГС	Голос споживача (ГС)												
3,57	ГС1	0,53	0,55		0,58	0,86		0,92					
3,71	ГС2	0,58	0,62	0,66	0,52	0,93		0,76				0,53	
4,57	ГС3		0,53	0,64	0,84	0,78			0,57			0,76	
2,71	ГС4	0,89	0,77		0,58							0,71	
4,43	ГС5	0,89	0,84			0,56		0,61					0,52
3,57	ГС6		0,65	0,67			0,7						
2,29	ГС7	0,67	0,56		0,59								
4,29	ГС8			0,92	0,61		0,88				0,64		0,86
4,57	ГС9				0,68					0,93			0,67
3,57	ГС10		0,57	0,91	0,79	0,53	0,81				0,74	0,66	0,61
3,71	ГС11		0,52	0,9	0,56	0,55	0,87				0,77		0,84
4,71	ГС12			0,96	0,91		0,81				0,92	0,53	0,77
2,57	ГС13		0,56		0,87	0,69		0,53					
3,29	ГС14		0,64		0,58	0,61	0,63					0,58	
4,43	ГС15			0,58	0,87						0,75	0,69	
2,86	ГС16		0,87	0,77				0,69	0,66		0,95		
3,57	ГС17		0,85		0,84		0,62				0,56		0,66
2,43	ГС18		0,73	0,77	0,71		0,53			0,78			0,53
	Цільове значення	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
I: низький, 5: високий	Вагові коефіцієнти ГСт	1,71	3,29	5	1,57	2,29	4,71	2,43	1,57	2,57	4,29	2,71	4,86
	Абсолютна важливість	38,27	120,8	194,3	61,5	68,62	144,7	51,8	26,9	40,7	120,5	82,24	132
	Відносна важливість, %	3,53	11,17	17,96	5,68	6,34	13,37	4,79	2,49	3,76	11,13	7,6	12,2
	Пріоритет	11	4	1	8	7	2	9	12	10	5	6	3

Рис. 1. HoQ КНМЗ

8) Розрахунок та пріоритизація ФВ.

Абсолютна важливість I_j кожної ФВ КНМЗ розрахована за формулою (1).

Відносна важливість Q_j розрахована за формулою:

$$Q_{ij} = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^L I_j} \cdot 100\% , \quad (4)$$

де L - кількість ФВ КНМЗ.

Стовпчикова діаграма коефіцієнтів важливості, розрахованих за формулою (4), наведені на рис. 2.

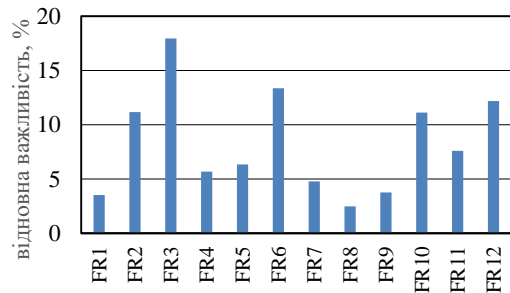


Рис. 2. Коефіцієнти важливості ФВ КНМЗ

З діаграми (рис. 2) можна зробити висновок, що важливість технічних характеристик розподілена нерівномірно. Тому потрібно визначити ФВ КНМЗ, які потребують першочергової уваги щодо наближення до цільових значень.

Пріоритизація ФВ КНМЗ здійснена згідно з принципом Парето (принцип «80 на 20») (рис. 3).

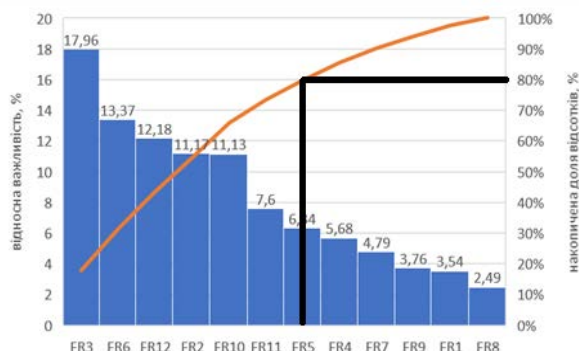


Рис. 3. Діаграма Парето важливості ФВ КНМЗ

До пріоритетних ФВ, які в першу чергу потрібно поліпшувати для досягнення цільових значень, відносяться:

ФВ3 - Забезпечення практичної підготовки здобувачів з метою набуття фахових компетентностей із врахуванням вимог стейкхолдерів із використанням прикладів практичної діяльності.

ФВ6 - Відповідність змісту КНМЗ сучасним науковим досягненням та практикам.

ФВ12 - Оновлення змісту КНМЗ не рідше за 1 раз на 5 роки, а внесення коректив, які враховують новітні досягнення науки та практики, - кожного року.

ФВ2 - Відповідність структури КНМЗ Навчальному плану та змісту ОП.

ФВ10 - Доступність програмних засобів, необхідних для використання практичних та лабораторних робіт.

ФВ11 - Наявність слайд-лекцій, структура яких відповідає вимогам документу «Положення про комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни».

ФВ5 - Наявність в КНМЗ зрозумілої інформації щодо цілей, змісту та програмних результатів навчання.

9) Впровадження корегуючих заходів

Метою запровадження регулюючих заходів є максимальне наближення пріоритетних ФВ до цільових значень, які становлять 100 %. Аналіз взаємозв'язку ФВ одна з одною дозволяє згрупувати регулюючі заходи в залежності від значущості коефіцієнтів кореляції.

Перша група ФВ скерована на забезпечення якісної практично-орієнтованої підготовки здобувачів з максимальним врахуванням вимог стейкхолдерів та розумінням останніх наукових та прикладних досягнень у навчальній дисципліні. До неї входять ФВ3, ФВ6 та ФВ12 (коефіцієнти кореляції є значущими і становлять 0,84, 0,81 та

0,87, відповідно). Заходи щодо покращення поточного стану цієї групи ФВ:

- проводити науково-практичні семінари кафедри зі стейкхолдерами на регулярній основі;
- звітувати про оновлення КНМЗ раз на рік на засіданні кафедри з наведенням переліку новітньої навчальної літератури та фахових публікацій;
- звітувати про власні публікації в фахових журналах за науковим напрямом дисципліни.

Друга група ФВ (ФВ2, ФВ11 та ФВ5 з коефіцієнтами кореляції 0,78 та 0,66) стосується відповідності ФВ КНМЗ рекомендаціям Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти (НАЗЯВО) «Роз'яснення щодо застосування Критеріїв оцінювання якості освітньої програми» (2024 р.), внутрішньої документації ХНУРЕ «Положення про комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни» та освітньо-професійної програми ООП «Якість продукції, процесів та програмного забезпечення» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти і ООП «Забезпечення якості» другого (магістерського) рівня вищої освіти. Заходи щодо покращення поточного стану ФВ другої групи:

- розробити та впровадити на кафедрі ІВТ контрольну форму звітності про відповідність ФВ цільовим значенням за моделлю самооцінки ДСТУ ISO 9004:2018 Управління якістю. Якість організації. Настанови щодо досягнення сталого успіху (ISO 9004:2018, IDT);
- за результатами звіту НПП повинен зробити доповідь на засіданні кафедри.

Заходи, скеровані на досягнення цільового значення ФВ10 - Доступність програмних засобів, необхідних для використання практичних та лабораторних робіт, наступні:

- обов'язково ввести в структуру КНМЗ розділ під назвою «Рекомендації з використання інформаційних технологій», в якому навести перелік програмних засобів, інтернет-сервісів, інших інформаційних ресурсів, які знаходяться у вільному доступі, корпоративних програмних продуктів ХНУРЕ, безкоштовного програмного забезпечення, необхідних або рекомендованих для засвоєння матеріалу навчальної дисципліни;
- навести рекомендації щодо застосування перелічених програмних засобів та інтернет-ресурсів із прикладами використання для розв'язання завдань навчальної дисципліни.

Пропонований адаптований алгоритм QFD може застосовуватись для ЗВО всіх профілей навчання, але якщо для спеціальностей галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» комплекс споживчих характеристик КНМЗ з розрахованими ваговими коефіцієнтами та комплекс виокремлених пріоритетних функціональних вимог до КНМЗ співпадає з наведеним в статті, то для спеціальностей інших галузей знань потрібно проведення окремих досліджень за розробленою методикою для повного врахування специфічних особливостей процесу набуття студентами компетентностей, що відповідають різним галузям знань.

6. Висновки

Стаття присвячена дослідженню можливостей підвищення якості споживчих характеристик ключового процесу освітньо-наукової діяльності ЗВО «Розробка НМЗ освітнього процесу» за допомогою інструменту управління якістю QFD.

Аналіз останніх публікацій, присвячених застосуванню методу QFD для покращення процесу надання освітніх послуг, довів відсутність досліджень українських науковців, скерованих на підвищення якості як освітнього процесу взагалі, так і окремих ключових процесів діяльності ЗВО, які б враховували особливості українського освітнього середовища. Доведена важливість деталізації споживчих характеристик кожного ключового процесу ЗВО, зокрема, процесу «Розробка НМЗ освітнього процесу».

Обґрунтовано застосування методу QFD, що базується на технології побудови НоQ, для виявлення та пріоритизації функціональних характеристик КНМЗ, які мають найбільш тісний кореляційний зв'язок зі споживчими характеристиками. В класичний алгоритм методу QFD додано етап «Почути Голос стейкхолдерів», що дозволяє врахувати запити стейкхолдерів щодо навчально-методичного матеріалу, яким користуються здобувачі вищої освіти для набуття фахових компетентностей, важливих для майбутньої професійної діяльності.

Сформовано комплекс з 18 ключових споживчих характеристик КНМЗ за результатами опитування студентів кафедри ІВТ (ХНУРЕ). Доведено узгодженість сформованого переліку споживчих характеристик за допомогою розрахунку коефіцієнту Альфа Кронбаха ($0,92 \geq 0,9$ для рівня значущості $\alpha = 0,01$). З урахуванням нормативних вимог експертним методом визначено перелік функціональних вимог до КНМЗ для максимального задоволення побажань здобувачів вищої освіти. Встановлено тісноту кореляційного зв'язку між функціональними та споживчими характеристиками КНМЗ. Введено та розраховано вагові коефіцієнти функціональних характеристик КНМЗ за

результатами опитування стейкхолдерів (Альфа Кронбаха $0,97 \geq 0,9$ для рівня значущості $\alpha = 0,01$).

Застосовано технологію НоQ для визначення важливості функціональних характеристик КНМЗ. В результаті отримано комплекс пріоритетних функціональних характеристик КНМЗ, виокремлених згідно з принципом Парето. Запропоновано регулюючі заходи для наближення значень функціональних характеристик до цільових значень.

Таким чином, розроблений алгоритм дій є ефективним інструментом для підвищення якості ключових показників діяльності ЗВО, а визначений комплекс споживчих і функціональних характеристик та безпосередньо результати розрахунків прикладного дослідження можна застосовувати для покращення рівня задоволеності здобувачів вищої освіти якістю НМЗ для всіх фахових навчальних дисциплін галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво. Для спеціальностей інших галузей знань потрібно проведення окремих досліджень за розробленою методикою для повного врахування специфічних особливостей процесу набуття студентами компетентностей, що відповідають різним галузям знань.

7. Перспективи подальших досліджень

Перспективи досліджень в даному напрямку вбачаються в проведенні окремого дослідження щодо визначення комплексного показника якості КНМЗ з точки зору здобувачів вищої освіти, яке визначить якість КНМЗ до впровадження запропонованих регулюючих заходів, та після реалізації заходів QFD. Метою дослідження буде підтвердження ефективності адаптованого алгоритму QFD для покращення якості НМЗ в ЗВО України. Довготермінові перспективи досліджень в даному напрямку полягають у подальшому впровадженні інструментів моделі управління якістю LSS для підвищення якості процесів в рамках створення комплексної системи управління якістю ЗВО на базі рекомендацій сучасних міжнародних стандартів.

Список літератури

1. Clayton M. Treading the quality path: a progress report ФВom Aston University. In *Total Quality Management*. Springer Netherlands, 1995. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0539-2_79
2. Ermer D.S. Using QFD becomes an educational experience for students and faculty. *Quality Progress*, 1995. P. 131-136. https://asq.org/quality-progress/articles/using-qfd-becomes-an-educational-experience-for-students-and-faculty?id=1b8d243a6d70458b9aef956e9923bfdd&srsrlid=AfmB0oqM6wpbs0-O975HJ-3Zdug4KaE4OVHuY2iX6_deP9T0t60U915v
3. Pitman G., Motwani J., Kumar A., Cheng C.H. QFD application in an educational setting: A pilot field study. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 1996. 13(4). P. 99-108. DOI:10.1108/02656719610114434
4. Hwang, H. B. & Cynthia, T. Translating customers' voices into operations requirements A QFD application in higher education. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2001. 18(2). P. 195-225. DOI:10.1108/02656710110379075
5. Kumar M., Umar B. M., Tersona R. Higher Education in India Using Quality Function Deployment. *Journal of International Law and International Relations*. 2012. 2(1). P. 1111-1118. DOI:10.5829/idosi.mejsr.2023.12.8.1639
6. Karanjekar, S.B., Lakhe, R.R. and Deshpande, V.S. A QFD Framework for translating customer requirements into key operational activities in technical education sector. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013. 2(10). P. 712-718. <https://www.ijert.org/research/a-qfd-ФBamework-for-translating-customer-requirements-into-key-operational-activities-in-technical-education-sector-IJERTV2IS100267.pdf>
7. Raissi N. Using QFD method for assessing higher education programs: An examination of key stakeholders' visions. *International Journal of Management in Education*. 2018. 12(1). P. 70-86. DOI:10.1504/IJMIE.2018.088386

8. Chan L.-K., Wu M.-L. Quality Function Deployment: A Comprehensive Review of Its Concepts and Methods. *Quality Engineering*. 2002. 15(1). P. 23-35. DOI:10.1081/QEN-120006708
9. Raza, S. A., Qazi, Z., Qazi, W., & Ahmed, M. E-learning in higher education during COVID-19: Evidence ФВom Blackboard learning system. *Journal of Applied Research in Higher Education*. 2022. 14(4). P. 1603-1622. <https://doi.org/10.1108/jarhe-02-2021-0054>
10. Rashid J., Amuthakkannan R. Implementation of Quality Function Deployment to Improve Online Learning and Teaching in Higher Education Institutes of Engineering in Oman. *International Journal of Learning Teaching and Educational Research*. 2025. 23(12). P. 463-486. DOI:10.26803/ijlter.23.12.24
11. Jnanesh N. A., Hebbbar C. K. Use of Quality Function Deployment Analysis in Curriculum Development of Engineering Education and Models for Curriculum Design and Delivery. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008*. https://www.iaeng.org/publication/WCECS2008/WCECS2008_pp574-577.pdf
12. Mou N., Mahfuzul R. Curriculum Development Through QFD for Business School: A Structured Literature Review. *The Jahangirnagar Journal of Business Studies*. 2018. 7 (1). P. 49 – 62. <https://ssrn.com/abstract=3281878>
13. Kanango J., Bhatnagar A., Gupta R., Kashiyap V. Designing a short-term training course curriculum using the quality function deployment (QFD). *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2023. 40 (9): 2247-227. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2022-0150>
14. Moshchenko I.O., Nikitenko O.M. Value Stream Map Optimization Model in the Field of Educational Services. *Collection of scientific works of the Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality*. 2023. 2(23). P. 6-15. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2023-2-23-6-15>
15. ISO 13053-2:2011 Quantitative methods in process improvement - Six Sigma - Part 2: Tools and techniques.
16. ISO 16355-1:2021 Application of statistical and related methods to new technology and product development process — Part 1: General principles and perspectives of Quality Function Deployment (QFD).
17. *Роз'яснення щодо застосування Критеріїв оцінювання якості освітньої програми: методичний посібник [Електронне видання] / А. Бутенко, Г. Денискіна, О. Єременко, О. Книш, І. Сімшаг, О. Требенко. Київ : Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти, 2024. 127 с.*
18. Moshchenko I.O., Zaporozhets O.V. Technology for implementing the Lean Six Sigma” quality management model in higher education institutions. Part 1: Identification and measurement of the educational process critical to quality characteristics. *Metrology and Instruments*. 2024. 1. P. 51-58. <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.10>
19. Moshchenko I.O., Zaporozhets O.V. Technology for implementing the “Lean Six Sigma” quality management model in higher education institutions. Part 2: inconsistencies analysis, educational process improvement and control of improvements sustainability. *Metrology and Instruments*, 2024. 2. P. 56-63. <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.2.11>

Надійшла (Received) 05.10.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 25.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Мощенко Інна - кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: inna.moshchenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0037>.

Moshchenko Inna - PhD, Associate Professor, IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: inna.moshchenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0037>.

Запорожець Олег - кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: oleg.zaporozhets@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7831-8479>.

Zaporozhets Oleg - PhD, Associate Professor, IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: oleg.zaporozhets@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7831-8479>.

Research on the degree of satisfaction of the requirements of higher education applicants with the quality of methodological support of the educational process in universities using the QFD method

I.O. Moschenko, O.V. Zaporozhets

Abstract

As the results of the survey of higher education applicants prove, the availability of high-quality methodological support is one of the most important components of the overall quality of the educational process. Since currently in Ukrainian educational environment a significant part of the country's leading universities operates remotely, the issue of accessible and understandable methodological support is one of the most important factors in obtaining a quality education. The purpose of the study is to develop an algorithm for analyzing consumers' requests of higher education applicants by the quality of methodological support based on the Quality Function Deployment (QFD) method and prioritizing the technical characteristics of methodological support in order to increase the satisfaction of consumers of educational services in Ukrainian universities. The research methodology is based on the application of the QFD method. Statistical processing of the results of the study was carried out using the methods of calculating the Alpha Cronbach coefficient, analysis of variance, correlation analysis, and the Pareto method. As a result of the study, an algorithm for applying the QDF method to improve the quality of educational services has been formed, which takes into account the specific features of the modern educational environment in Ukraine. A list of developed consumers' and technical characteristics of methodological support with defined weights can be applied to increase the satisfaction of consumers of educational services with the quality of methodological support who to get an education in the field of knowledge G, and the general algorithm – to improve the quality of educational services in all universities of Ukraine.

Keywords: quality function deployment, adapted algorithm, statistical analysis, correlation analysis, statistical processing of results, functional requirements.

METHODS FOR IMPROVING PRINT QUALITY FOR KONICA MINOLTA 6085 DIGITAL PRINTING PRESS

O.V. Vovk, I.B. Chebotarova, D.O. Donskiy, R.I. Chebotarov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Abstract

The paper examines the use of different raster structures with different dot shapes, taking into account the typical recommendations of printing press manufacturers and the features of the Konica Minolta 6085 printing press to improve the quality of printed products. The use of various rasterization technologies allows solving not only the classic problems of moiré formation, graininess, improving the smoothness of halftone printing, etc., but also more specific problems. The use of different forms of raster dots in digital printing can be used to expand the color gamut; the combination of stochastic rasterization, different forms of dots and high-precision line screen allows you to simulate various printing processes and make better quality color proofs. Based on the results of the evaluation, recommendations were developed for the selection of types of rasters according to the types of originals and materials.

Key words: digital printing; assessment; quality; stochastic; raster; rasterization; line screen.

1. Introduction

Improvement of printed product quality is an important issue for printing enterprises. At the same time, quality control in digital printing companies is usually carried out only by the print operator, visually based on the principle of “like/dislike” or “close to the layout”, as there are no clear, officially recognized criteria for evaluating digital print quality. A relevant issue is the study of methods for improving print quality for digital printing press. One of these approaches is to use various methods of rasterization with a specified line screen.

The purpose of the work is to investigate ways for improving print quality for the Konica Minolta 6085 printing press through additional rasterization capabilities.

In order to achieve the goal, it is necessary to perform the following tasks:

- investigate the characteristics of digital printing that may influence print quality;
- develop test images for experimental printing;
- select digital printing quality indicators;
- select printing materials for studying the quality of digital printing;
- conduct an evaluation of the prints;
- develop recommendations for choosing types of rasters based on types of originals and materials.

The study was conducted at the printing company LLC «Drukarnia Madrid» in Kharkiv, Ukraine on the Konica Minolta 6085 printing press, using the most popular printing materials at the company.

2. Digital image parameters that affect print quality

Due to the absence of national standards for digital printing, the analysis of its quality is subjective. The engineering evaluation of digital printing quality is carried out using the international standard ISO/IEC 24790:2017 [1], which assesses the accuracy of font, line, and spot reproduction. This document applies to human-readable monochrome documents produced by

printers and copiers. However, the standard does not address the quantitative values within which measurements are to be made, does not provide a methodology for creating a test object, calibrating equipment, or a list of parameters necessary for evaluating different printing technologies.

The concept of quality implies a set of properties or characteristics, and is therefore defined by a single value [2]. The quality assessment of a printed image is most often carried out by experts, who draw conclusions by combining technical data with their subjective evaluations [3]. Digital printing is a reproduction of the original, which allows for the selection of reference values for the test-object indicators, specific to each of the chosen parameters. In order to calculate the quality indicator and then the overall quality index, each print quality parameter on the test strip will correspond to its own test object. According to the analysis of works [2, 4-16], the quality of digital image printing is influenced by parameters such as resolution, dot shape, line screen, raster rotation angle, etc.

1. Resolution.

The selected resolution affects the file size on the disk, the speed of processing the document in the image editing program, and the time it takes to print.

The resolution at which the image is to be sent to the output device is called the output resolution and is determined by the spatial frequency of the raster. In the field of digital prepress, there is an empirical rule stating that the output resolution should be equal to twice the line screen of the raster (300 ppi (Pixels Per Inch) for a raster with a line screen of 150 lpi (Lines per inch)).

2. Raster Line Screen.

The number indicated in the printing press specifications as the resolution is the number of real dots that the machine prints per inch (for example, 600 or 1600 dpi (Dots Per Inch)). The number of raster dots per unit length is referred to as the line screen. The line screen is measured in lpi.

The ratio of the output device's resolution to the raster line screen determines the size of the raster cell's sides, measured in printer dots. The maximum number

of dots in a printing press that form a raster dot equals the square of the cell's side length.

The quality of halftone reproduction depends on the tonal range. However, at least 150 shades of gray are required for this, while high-quality printing requires a much larger number of halftones to be rendered (Table 1).

Table 1 – Recommended line screens for printing

lin/cm	lpi	Publication type
12-24	30–61	raster images of printers
24-48	61–122	illustrations in newspapers
48-60	122–152	magazine illustrations
60-80	152–203	advertising and artistic publications
80-120	203–305	special editions and stereo printing

The sharpness and clarity of the image improve with an increase in line screen, and the visibility of the raster decreases. However, the number of reproduced gradations and the smoothness of tone reproduction are reduced if the line screen is increased without a corresponding reduction in the level of inherent visual noise in the platemaking and printing processes. The choice of line screen value can be considered correct if it ensures an optimal balance between different quality indicators, such as image sharpness and tone smoothness. A quantitative expression of this

compromise ratio is the value of the relative areas of the minimal dots and spaces [2, 15]. Additionally, the line screen should be selected in accordance with the material on which the printing is performed.

3. Dot Shape.

Ensuring the accuracy of reproducing print elements and minimizing the size of gaps is a fundamental criterion for optimizing the process of raster image printing. At the same time, originals may vary significantly in nature. Some may primarily contain fine details and contours with an absence of background, while others may require accurate tone rendering without noticeable transitions, rather than fine details in the images. It's clear that for the first type of images, where small details predominate, a higher line screen is used, as suggested by the aforementioned standard method. On the other hand, for "soft" images, it is desirable to slightly reduce the line screen while simultaneously maximizing the number of shades that can be reproduced. Therefore, in order to improve print quality, various dot shapes can also be used depending on the type of images and materials on which the printing is performed. The main types of raster structures for Konica Minolta 6085 printing press are shown in Figure 1 [6, 11, 17].



Fig. 1. Types of raster structures for Konica Minolta printing press

Following control tools are used for quality control during the prepress stage and printing process [18, 19]:

a) TECHKON SpectroPlate Digital Microscope is used for checking the shape of raster dots. It is designed for measuring the parameters of analog and CTP plates, printing films, and printed impressions;

b) X-Rite 518 Spectrodensitometer is used for monitoring the printing process and determining print quality parameters. Its functions include measuring optical density, dot gain, area of raster dots, contrast, trapping, etc.;

c) Eye-One Pro UV Cut Spectrophotometer is used for controlling color reproduction accuracy and creating printing profiles. It is designed for measuring the spectral characteristics of light and provides the ability to obtain color information in various color systems.

3. Quality indicators of digital printing

The purpose of the research is to select technological parameters for improving the quality of digital printing in the context of an operating enterprise. Therefore, a simplified scheme of comprehensive analysis is entirely

acceptable, where individual quality indicators that are specific to this production are analyzed. After calculating the quality indicators, the obtained values are compared with the reference value, and conclusions regarding quality are made. A comprehensive quality assessment includes visual evaluation by the consumer, instrumental evaluation, and the use of physical quality indicators of prints obtained through printing on Konica Minolta 6085 printing press.

It is necessary to investigate the impact of various image parameters (resolution, line screen, dot shape, etc.) on the quality of digital printing.

As mentioned earlier, the quality of digital printing results is usually evaluated visually, as there are no clear, officially regulated evaluation criteria. Therefore, the issue of assessing print results is particularly relevant, especially in cases where printing is done with non-reference parameters. That is, each printing press has settings recommended by manufacturers for the most common materials, such as offset or coated paper, etc. However, more than half of the jobs are performed on other materials, such as design papers, printing films, self-adhesive materials, etc. Developing quality indicators that

account for additional settings in digital printing, as well as recommendations for using additional printing modes for different materials, is a crucial task for a printing company that aims to attract and retain its clients [20].

There were 12 parameters identified during the analysis of works devoted to the quality of digital printing [6, 10, 11, 14, 15], according to which researchers evaluated digital printing (see Table 2).

Table 2 – Digital printing evaluation criteria

No	Evaluation criteria	Print characteristics
1	Absence of excessive background optical density	The background should be clean
2	Overall print uniformity	It should not contain poorly printed, overly light or dark spots
3	Normal optical density of the image	The print should not appear overloaded or oversaturated
4	Clear gradation reproduction	All transitions should be clearly visible
5	Satisfactory image resolution	Small details should be clearly noticeable when examined closely
6	Sufficient print resolution	The print should appear sharp, with no blurring of contours
7	Font reproduction quality	Reproduction of the smallest font sizes and high-quality letter elements
8	Gloss	Distributed evenly across the entire print area
9	Degree of toner adhesion to the substrate	The ink should not flake off or wash away with water
10	Color gamut	A high-quality print should include all colors from the layout
11	Reproduction of memorable colors	Memorable colors should be reproduced realistically
12	Image contrast	Reproduction of the lightest and darkest shades

According to the set task, it is not necessary to consider all the indicators for quality assessment. Indicators related to background density or print resolution are not critical, as high-quality printing equipment and materials are used for the experiment. Therefore, some indicators will not be calculated, but their visual examination will be conducted in order to gather information for developing recommendations for printing.

After analysis, items 6 and 9 from Table 2 were excluded from consideration, as printing is carried out using high-quality printing press with high resolution, which ensures both sufficient print resolution and good adhesion. Item 1 (background optical density) will be investigated to confirm the quality of the printing materials, but this parameter will not be considered for the overall assessment. Instead, it is proposed to calculate image contrast as the difference between the maximum and minimum optical densities of the image. Increasing the line screen leads to the reproduction of a more saturated image, thus increasing the contrast. Therefore, this indicator has been included for consideration. Item 8 (gloss) will be assessed visually. Printing is performed on materials with different surfaces, so this indicator is not always necessary. It is suggested to add gray balance, which provides an understanding of the consistency of primary and auxiliary color triads (their overlaps) in highlights, halftones, and shadows, i.e., the image's balance in the achromatic component. Its reproduction also depends on the set line screen and dot shape, so it will be evaluated visually, and the analysis of this indicator will be considered in the recommendations. The evaluation of the uniformity of solid print area is especially important when printing images with large solid areas. This parameter should be controlled, which is confirmed by many researchers of print quality.

The following final nomenclature of indicators has been chosen for the study:

- halftone reproduction (print linearity);
- optical density of the image;

- font reproduction quality;
- contrast;
- color deviation;
- print uniformity;
- color gamut.

4. Development of a test image for assessing the quality of digital printing

Test images were developed based on the analysis of various test images recommended in the literature [3, 21] and used in production for digital printing testing. Based on the print format, two layouts were designed – the first one is for the analyzing and visual evaluating the images, and the second one is for determining the main indicators for assessing digital print quality. The test objects were divided into two categories in order to conduct both subjective and objective analysis of digital print quality. The subjective evaluation was performed by experts and then compared with quantitative indicators.

Accordingly, the developed test images included test objects for the quantitative assessment of quality indicators (print uniformity, print linearity, contrast, color gamut, color deviation) and elements for visual evaluation by experts (images in RGB and CMYK color systems for assessing the reproduction of memorable colors, a scale for evaluating gray balance, test objects for font quality control, and objects with gradient fills for visual assessment of print linearity).

The developed test images with control elements were printed on selected materials with specified line screen parameters and different dot shapes, as shown in Figure 2.

Linearity, as one of the most important quality indicators, was assessed by the number of halftones reproduced. A scale with various relative dot sizes ranging from 0 to 100% was used. The scales were designed for both primary and secondary colors (see

Figure 2.1). For visual control of gradient linearity, scales with linear and radial gradients were used (see Figure 2.2). In order to assess color reproduction accuracy, the Ugra/Fogra Media Wedge V3 control scale was used (see Figure 2.3).

The reproduction of memorable colors is crucial for accurate color representation in paintings and photo reproductions. It was controlled based on the corresponding images (see Figure 2.4). Another indicator is gray balance (see Figure 2.5).

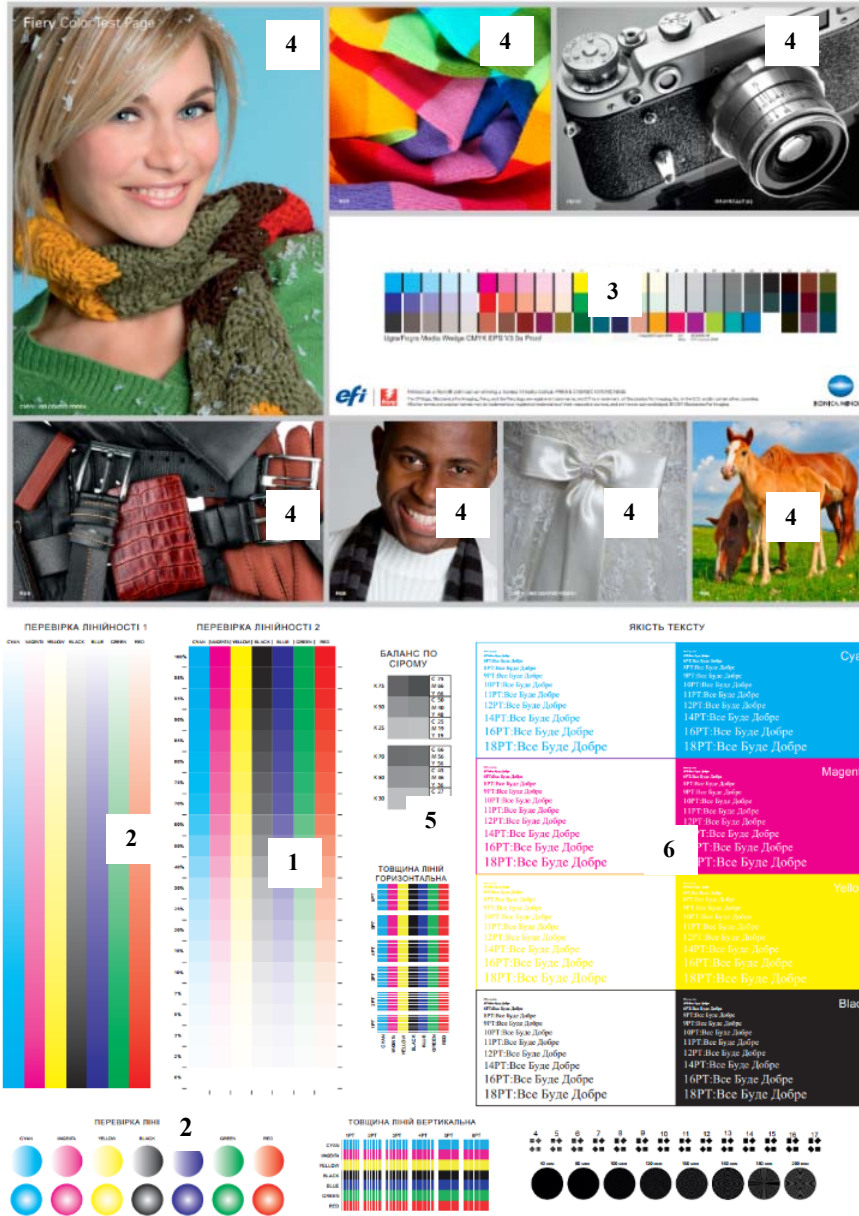


Fig. 2. Test images

The test object for determining print uniformity consists of printed solid areas of primary colors, placed both along the length and width of the print. They are also used for controlling text “reversal”. Four optical density measurements were made in both the horizontal and vertical directions (see Figure 2.6).

Contrast is defined as the difference between the maximum and minimum optical densities of the image. In order to calculate contrast, scales are required to control light and dark shades with maximum and minimum optical density values (see Figure 2.2).

5. Selection of printing materials

Materials used at the enterprise were considered for the experiment. The analysis of orders allowed for the selection of materials most commonly chosen by customers:

1. Coated paper, glossy surface, density 170 g/m²;
2. Coated paper, matte surface, density 150 g/m²;
3. Coated cardboard, matte surface, density 300 g/m²;

4. Linen embossed textured cardboard, linen, density 230 g/m²;
5. Constellation Snow Lime textured cardboard, dot, density 280 g/m²;
6. Plike White design paper, smooth texture (properties similar to plastic), density 330 g/m²;
7. Self-adhesive paper.

All of these materials above are classified as high-quality papers. Design paper and textured cardboard were selected for studying the potential for improving print quality on these materials.

Printing was carried out with line screens of 150, 200, and 300 lpi during the experiment. After analyzing the screening technologies and the characteristics of raster structures, the following dot shapes were selected: Round, Square, Rhomboid, Line, Double Dot.

6. Print Quality Evaluation

After printing the samples, a preliminary expert evaluation of the prints was conducted.

Considering the tasks set for the research, five experts working in digital printing companies were selected: a designer, a technologist, a manager, a print

operator, and a head of the production department. The main criteria for selecting experts included options as formal indicators (e.g., position, years of experience in the industry, etc.), success in previous evaluations (clear understanding of the tasks set, adequate and fair assessment), and familiarity of the expert with other group members (trust in the results of other experts, personal responsibility to other participants). Expert assessments are required for comparison with the results of instrumental control and calculations. An expert survey was conducted for the visual evaluation of the obtained images, in which experts determined the nomenclature of quality indicators for digital printing.

Taking into account the experts' level of expertise, the ranking method was preferred. For each expert, the task was to number the prints on different materials from 1 to 7, where 1 represents the worst quality, and 7 represents the best one. In doing so, experts assessed both objective indicators (e.g., gradation characteristics, print uniformity, gray balance) and subjective quality indicators (reproduction of memorable colors, gloss and texture of the surface, etc.).

The expert evaluations of the prints on different materials are shown in Table 3.

Table 3 – Evaluation of material samples by experts

Printing Material	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Sum	Rank
	Designer	Technologist	Manager	Print operator	Head of Prod. Dept.		
Coated paper, glossy surface	7	5	7	6	6	31	2
Coated paper, matte surface,	5	6	5	5	5	26	3
Coated cardboard, matte surface	6	7	6	7	7	33	1
Textured cardboard, linen	1	1	2	1	1	6	7
Textured cardboard, dot	2	2	1	2	2	9	6
Design paper	4	3	4	3	3	17	5
Self-adhesive paper	3	4	3	4	4	18	4

The lowest scores were given to textured printing materials (highlighted in bold). According to the experts, the additional rasterization capabilities could not improve the print quality on these materials. Thus, they will not be used in further research.

After the preliminary analysis, key indicators that have a significant impact on the quality of digital printing with additional settings were identified, shown in Table 4.

Table 4 – Results of refining the nomenclature of print quality indicators

Print quality indicator	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Sum	Rank
	Designer	Technologist	Manager	Print operator	Head of Prod. Dept.		
Halftone reproduction	6	7	5	7	6	31	2
Optical density of the image	1	3	1	2	2	9	6
Font reproduction quality	2	1	2	1	1	7	7
Contrast	3	4	4	4	4	19	4
Color deviation	7	5	7	6	7	32	1
Print uniformity	5	6	6	5	5	27	3
Color gamut	4	2	3	3	3	15	5

Experts survey results in Table 3 illustrate that the optical density of the image and font reproduction quality received the lowest scores and were excluded. The maximum optical density is measured and affects the image contrast. Therefore, only this indicator was left. Font reproduction quality will be evaluated visually. This parameter is of interest in terms of reproducing finer line screen or other dot shapes, but it

does not impact the final print quality. Each of these indicators has a threshold value, and exceeding it indicates a defect. The baseline and threshold values of the parameters [2, 5, 6, 15] are determined based on practical recommendations from printing equipment manufacturers and print regulatory documentation (see Table 5).

Table 5 – Baseline and threshold values of individual indicators

№	Print quality indicator	Baseline (reference) value	Threshold value of indicator	
			min	max
1	Gradations of reproduction	71	50	–
2	Contrast	45	30	–
3	Color gamut	11511	9750	–
4	Color deviation	3	–	4
5	Print uniformity	0,017	–	0,024

Gradation reproduction or print line screen can be assessed by the number of halftones reproduced during printing. For this purpose, a scale with varying relative sizes of the halftone dot from 0 to 100% is used. The analysis was conducted using a method based on

calculating the thresholds of lightness difference in each area and took into account the tonal reproduction characteristics at different parts of the gradation curve (highlights, halftones, and shadows) [11] (see Table 6).

Table 6 – Results of optical density measurement and line screen calculation

Dot Shape	Line Screen	$D_{background}$	$D_{25\%}$	$D_{75\%}$	$D_{100\%}$	N
Round	150 lpi	0,07	0,24	1,61	2,57	88,7
	200 lpi	0,07	0,23	2,28	2,59	119,5
	300 lpi	0,08	0,24	2,41	2,61	125,2
Line	150 lpi	0,07	0,3	2,1	2,69	115,0
	200 lpi	0,08	0,29	2,36	2,61	125,3
	300 lpi	0,07	0,27	2,53	2,61	133,3
Square	150 lpi	0,07	0,26	2,35	2,63	124,4
	200 lpi	0,07	0,23	2,39	2,57	124,6
	300 lpi	0,08	0,24	2,6	2,74	134,5
Rhomboid	150 lpi	0,07	0,25	1,76	2,64	96,4
	200 lpi	0,08	0,25	2,39	2,62	124,8
	300 lpi	0,08	0,25	2,47	2,67	128,7
Double Dot	150 lpi	0,07	0,21	2,51	2,67	129,5
	200 lpi	0,07	0,14	2,48	2,64	124,5
	300 lpi	0,07	0,13	2,5	2,66	125,0

Line screen for all prints meets the specified evaluation criteria, i.e., it exceeds the reference value. However, visual assessment shows better results for lower line screen. As the line screen increases, the amount of ink also increases, which expands the dynamic range but results in too dark areas. In order to improve this parameter, it is necessary to create specific printing profiles that compensate for this non-linearity.

In order to analyze the print contrast on selected print materials, the relative contrast indicator was used. It provides a balance between the maximum optical density in solid print areas and the minimal dot gain in the image. To determine the relative contrast value in digital printing, the relative area of the 75% halftone field is measured, as this field lies on the critical boundary of the “gray” zone, where most halftones are located.

Below are the values of relative contrast for digital printing on various materials, determined experimentally and recommended in regulatory documents [22]:

- plain paper – 23-25;
- calendered paper for offset printing – 30-35;
- coated paper for offset printing – 40-45;
- printing film – 35-40.

The contrast of coated paper is taken as the reference value. Contrast of calendered paper for offset printing is taken as the limiting value (see Table 7).

A zero contrast value indicates complete ink spread in the 75% halftone field, which, in turn, signifies the “loss” of all details in the dark part of the image.

The obtained results show a very low relative contrast value for prints with screen rulings of 200 and 300 lpi. This is explained by the high ink coverage at higher line screens. It is recommended to use a line screen greater than 150 lpi, along with compensation curves and appropriate profiles. The best contrast values were shown by prints with Round and Rhomboid dot shapes. The worst results were observed for the Double Dot shape. Color gamut allows for the assessment of the maximum number of colors that a digital printing press can reproduce on selected substrates (print color gamut) with specified additional parameters.

During subtractive synthesis, which is applied in ink and toner printing, the color gamut is formed in the shape of a hexagon. The vertices of this hexagon correspond to the primary process colors (cyan, magenta, yellow) and the colors resulting from their pairwise overlaps (blue, green, red). Increasing the color gamut area enables the reproduction of a wider range of colors.

We will calculate the color gamuts of the selected print material with different dot shape settings at the maximum line screen. Having mathematically calculated the projection area of the color gamut onto the $a*b^*$ plane, we will compare the color gamuts for different dot shapes and draw conclusions regarding the quantitative evaluation of the color gamut as the result of the experiment (see Table 8).

Table 7 – Calculation of relative print contrast

Dot Shape	Line Screen	D _{100%}	D _{75%}	K
Round	150 lpi	2,57	1,61	37
	200 lpi	2,59	2,28	12
	300 lpi	2,61	2,41	8
Line	150 lpi	2,69	2,1	22
	200 lpi	2,61	2,36	10
	300 lpi	2,61	2,53	3
Square	150 lpi	2,63	2,35	11
	200 lpi	2,57	2,39	7
	300 lpi	2,74	2,6	5
Rhomboid	150 lpi	2,64	1,76	33
	200 lpi	2,62	2,39	9
	300 lpi	2,67	2,47	7
Double Dot	150 lpi	2,67	2,51	6
	200 lpi	2,64	2,48	6
	300 lpi	2,66	2,5	6

Table 8 – Calculation of color gamut

Dot Shape	Line Screen	8
Round	300 lpi	13387,52
Line	300 lpi	13768,16
Square	150 lpi	13301,06
	200 lpi	13393,918
	300 lpi	14037,56
Rhomboid	300 lpi	13486,49
Double Dot	300 lpi	12569,05

According to the calculated results of this parameter, the largest color gamut is observed in the print with the Square dot shape. We will calculate the

gamut for screen rulings of 150 lpi and 200 lpi for this dot shape.

As seen, the difference between these values is quite small (see Table 5), so it can be concluded that printing with a lower screen ruling will also give satisfactory results.

The best values for this parameter are found in the Square and Line dot shapes. The lowest value is observed for the Double Dot shape.

The calculations of the projected areas of the color gamuts are presented in Table 9. We will also determine the projected area of the color gamut for the reference sample (see Table 10).

Table 9 – Color coverage values for coated cardboard

Color/ Dot Shape	Round			Square			Rhomboid			Line			Double Dot		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	B	L	a	b
Cyan	46,5	-26	-59,2	46,2	-26,5	-59,6	46,4	-26,4	-59,5	46,4	-25,9	-59,4	46,4	-26,4	-59,5
Magenta	46,4	74,4	-4,5	46	75,6	-4,8	46	75	-4,7	46,5	74,3	-4,8	46	75	-4,7
Yellow	89,1	-10,2	95,4	89,4	-10,42	97,3	89,6	-10,3	97	89,1	-10,2	95,9	89,6	-10,3	97
Black	8,8	-0,3	-0,3	6,9	-0,2	0	8,1	-0,2	-0,2	8,7	-0,2	-0,3	8,1	-0,2	-0,2
Red	47,7	63,4	52,7	46,6	65	53,7	46,8	63,3	53,9	47,7	63,4	53,1	46,8	63,3	53,9
Green	41,9	-66,8	19,4	41,2	-69,6	20,7	41,5	-68,1	20,9	40,9	-65,8	19,3	41,5	-68,1	20,9
Blue	19,1	19,6	-42,6	17,8	20,9	-43,3	18,5	20	-43,5	18,2	20	-42,3	18,5	20	-43,5
Color coverage area	13387,52			14037,56			13486,49			13768,16			12569,05		

Table 10 – Lab coordinates of the reference sample

Color	L	a*	b*
Cyan	67	-36	-45
Magenta	61	66	-5
Yellow	96	-6	88
Black	7	5	21
Red	57	65	43
Green	61	-61	28
Blue	39	11	-44
Color gamut of the reference			11511

The color coordinates of the reference value were obtained by measuring the Lab coordinates of the original file of the developed test image in Adobe Photoshop. The analysis performed shows that all samples exceed the reference value. Printed prints with square and linear dot shapes have the widest color

gamut (greater dynamic range). This allows for printing with photorealistic quality as well as reproducing bright and saturated colors. A comparison of these gamuts with the offset printing range for coated paper shows a very close match. The only noticeable difference is in the yellow colors. The saturated and bright colors are well reproduced during printing, which is also confirmed by visual evaluation.

Color deviation is a property of the system to reproduce colors, where the degree of match between the original colors and the print ones is proposed to be evaluated using the color difference metric, ΔE . Two-tone or three-tone scales can be used for color control. The color differences are shown in Table 11.

Calculation of color reproduction accuracy showed a mismatch of this criterion for all prints with higher line screens. Negative results will be considered when

developing recommendations for improving the printing process quality. The best color difference value can be noted for prints with linear and round dot shapes at 150 lpi line screen. The poorest result was observed for the double dot (16.32), which significantly exceeds the threshold limits.

Table 11 – Color deviation

Dot Shape	Line Screen	ΔE
Round	150 lpi	2,82
	200 lpi	3,5
	300 lpi	7,2
Line	150 lpi	2,57
	200 lpi	4,34
	300 lpi	9,86
Square	150 lpi	2,9
	200 lpi	4,6
	300 lpi	10,08
Rhomboid	150 lpi	3,5
	200 lpi	5,02
	300 lpi	11,2
Double Dot	150 lpi	8,7
	200 lpi	11,15
	300 lpi	16,32

Print uniformity is an indicator, which allows the assessment of the uniformity of solid area, that is particularly important when printing images with large solid areas. Although modern digital printing usually handles solid print area well, this parameter should still be monitored, as many print quality researchers confirm [23].

Print uniformity is calculated as the arithmetic average of the macro-heterogeneity of printing in both horizontal and vertical directions, which corresponds to the standard deviation. The obtained print uniformity values are summarized in Table 12.

All obtained values meet the specified quality criteria. Results indicate that modern digital printing no longer exhibits the defect of print uniformity issues, as it

did previously. In order to fully represent the printing features with additional settings, a visual assessment of font quality, gray balance, etc., is required. Additionally, expert evaluation of the printed samples should be conducted in order to check the reproduction of memorable colors, line resolution, and other indicators that can be visually assessed.

Table 12 – Print uniformity indicators

Dot Shape	Line Screen	M
Round	150 lpi	0,0096
	200 lpi	0,0020
	300 lpi	0,0082
Line	150 lpi	0,005
	200 lpi	0,0058
	300 lpi	0,005
Square	150 lpi	0,0058
	200 lpi	0,002
	300 lpi	0,0096
Rhomboid	150 lpi	0,0082
	200 lpi	0,0058
	300 lpi	0,002
Double Dot	150 lpi	0,0058
	200 lpi	0,005
	300 lpi	0,0096

After performing instrumental analysis of the quality indicators, the following ranking of prints by dot shape can be established:

- 1 – Rhomboid;
- 2 – Line;
- 3 – Round;
- 4 – Square;
- 5 – Double Dot.

In order to confirm the obtained results, visual evaluation of the prints was conducted by a group of experts for print sets with different dot shapes. Their ranking corresponds to the results obtained (Table 13).

Table 13 – Results of refining the nomenclature of quality indicators

Dot Shape	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Sum	Rank
	Designer	Technologist	Manager	Print operator	Head of Prod. Dept.		
Round	3	2	2	3	4	14	3
Line	5	3	4	5	3	20	2
Square	2	4	3	2	2	13	4
Rhomboid	4	5	5	4	5	23	1
Double Dot	1	1	1	1	1	5	5

7. Conclusions

The research conducted in this work allows to draw conclusions and recommendations regarding the successful use of various raster structures and additional settings of digital printing presses in order to enhance print quality and expand printing capabilities.

The analysis of different raster structures usage demonstrated that various forms of raster dots can produce a microrelief visible to the naked eye on the print's surface. This can simulate a textured material on ordinary coated cardboard. This approach can partially solve the problem of printing on textured materials. Printing of solid areas or

fine image details on textured cardboards is not possible without a loss of quality. Therefore, clients of digital printing companies can be offered the option to use regular materials with raster simulation, for example, for creating covers. Additionally, these materials are significantly cheaper than design cardboards.

Experiments with different line screens demonstrated that usage of higher line screens significantly expands the color gamut and increases image contrast. However, without specially created profiles, this leads to considerable color reproduction distortions. We obtain very saturated and vivid colors but

with unsatisfactory color accuracy. This factor must be taken into account when fulfilling orders where precise color reproduction is required by the client. In such cases, it is recommended to reduce the screen ruling to 150 lpi, as opposed to the standard settings. This will somewhat reduce the color gamut coverage but will achieve the necessary color accuracy. Additionally, it is advisable to create printing profiles for the most commonly used materials (especially textured ones) for further work.

The use of high line screens is recommended when the client requires so-called “acid” shades, which are very popular colors nowadays.

The obtained results also confirmed that fonts look good on almost any background up to 4-point size. A 2-point font size looks clearly only on a white background

but it almost blends into the colored background on the reversal. However, this should not be considered as a disadvantage, since in practice, texts printed in fonts smaller than 6 points size are very rarely used – they are difficult to read, especially with the naked eye. It is recommended to use higher line screens and additional font customization options for reproducing microfonts.

Additionally, for more effective collaboration with clients, it is also recommended to develop a catalog showcasing examples of advanced printing capabilities.

Usage of different raster structures with various line screen options is one way to improve print quality without additional financial costs, while simultaneously expanding the product range and attracting consumer’s interest.

References

1. ISO/IEC 24790:2017. Information technology – Office equipment – Measurement of image quality attributes for hardcopy output – Monochrome text and graphic images.
2. Дурняк Б.В., Ткаченко В.П., Чеботарьова І.Б. Стандарти в поліграфії та видавничій справі: довідник. Львів: УАД, 2011. 320 с.
3. Chebotarova I., Vovk O., Chebotarov R., Mendielieva M., Manakov V., Trunova T. Using the Delphi Method for Expert Evaluation of Digital Images by Lightness. *ACIT'2025 – 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies*. 2025. С. 55-58. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185761>.
4. Вовк О.В. Організація виробничого процесу на поліграфічному підприємстві «Формат-Харків». Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Інновації: монографія. Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2022. С. 5-36..
5. Вовк О.В., Чеботарьова І.Б., Поленок Д.В. Дослідження особливостей кольоровідтворення на підприємстві ТОВ «НАРГУС». *Radiotekhnika*. 2022. № 209. С. 226-238.
6. Гавриш С.В., Григор'єв О.В., Чеботарьова І.Б. Оцінка якості широкоформатного друку. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. 2020. Т. 2. С. 87-89.
7. Григор'єв О.В., Вовк О.В. Метрологічне забезпечення якості поліграфічної продукції. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. 2022. Т. 1. С. 16-17.
8. Григор'єв О.В., Вовк О.В., Петренко А.І. Метрологічне забезпечення виробництва в Україні. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. 2022. Т. 1. С. 20-21
9. Григор'єв О.В., Похил А.В., Вовк О.В. Види та засоби вимірювань у післядрукарських процесах. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. 2023. Т. 1. С. 12-13.
10. Донський Д.О. Дослідження способів підвищення якості друку для цифрової машини Konica Minolta. *Інформаційні технології в сучасному світі: дослідження молодих вчених*. 2024. С. 116.
11. Кульбич І.К., Лотоцька О.І. Оцінка якості відбитків при цифровому друці. *Технологія і техніка друкарства*. 2013. № 4. С. 25-39.
12. Манаков В.П., Чеботарьова І.Б., Чеботарьов Р.І., Муравйова А.В. Розробка та апробація методики комплексної оцінки рівня якості флексодруку екструзійного пакування. *Traektorія Nauki = Path of Science*. 2016. Том 2. № 4 (9), С. 18-32.
13. Поленок Д.В., Вовк О.В. Стандартизація кольоровідтворення на друкарських підприємствах з флексографії. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. 2022. Т. 1. С. 42-43.
14. Ткаченко В.П., Манаков В.П. Цифровий оперативний друк: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2007. 236 с.
15. Ткаченко В.П., Чеботарьова І.Б., Киричок П.О., Григорова З.В. Енциклопедія видавничої справи: навч. посібник. Х.: ХНУРЕ, 2008. 320 с.
16. Чеботарьова І.Б., Манаков В.П. Дослідження засобів та методів управління якістю на підприємстві «Бурунін і К». Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: монографія. Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2021. С. 164-188.
17. Кулинченко М.П., Зубченко М.Г., Чабан М.А., Чеботарева І.Б. Технологія Flat Top Dots у виготовнні флексографських друкарських форм. *Біоніка інтелекту*. 2016. № 1(86). С. 149-154.
18. Ansystem. i1Basic Pro UVcut (Eye-One Basic Pro UV Cut). URL: https://www.ansystem.com/gretagmacbeth/?code_no=2731559#description (дата звернення 22.08.2025 р.).
19. Ansystem. X-rite 518 SpectroDensitometer. URL: https://ansystem.com/gretagmacbeth/?code_no=5602106 (дата звернення 22.08.2025 р.).
20. Khlynyna S., Vovk O., Chebotarova I. Prospects for using artificial intelligence for book layout. *Jóvenes en la ciencia*. 2024. № 26. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4236/3717>.
21. AccurioPress C6100/C6085 COLOUR PRODUCTION PRINTING SYSTEM QUICK GUIDE. URL: https://tilematikidirect.gr/wp-content/uploads/accuriopress-c6100-c6085_quick-guide_en_1-1-0.pdf (дата звернення 22.08.2025 р.).
22. Інтелектуальний контроль якості з IQ-501. URL: <https://www.konicaminolta.ua/uk-ua/solutions/iq-501> (дата звернення 22.08.2025 р.).
23. Sharma G. The Digital Color Imaging Handbook. New York: CRC Press. 2003. 764 p.

Надійшла (Received) 05.09.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 20.09.2025

Відомості про авторів / About the authors

Вовк Олександр Володимирович – Кандидат технічних наук, доцент кафедри Медіасистем і технологій Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: oleksandr.vovk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9072-1634>

Vovk Oleksandr – PhD, Associate Professor, MST Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: oleksandr.vovk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9072-1634>

Чеботарьова Ірина Борисівна – ст. викл. кафедри Медіасистем і технологій Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: iryna.chebotarova@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0105-4484>

Chebotarova Iryna – Sr. Lecturer, MST Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: iryna.chebotarova@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0105-4484>

Донський Дмитро Олександрович – аспірант кафедри Медіасистем і технологій Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: dmytro.donskyi@nure.ua

Donskiy Dmytro – PhD Student MST Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: dmytro.donskyi@nure.ua

Чеботарьов Руслан Ігорович – аспірант, кафедри Медіасистем і технологій Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: ruslan.chebotarov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1191-775X>

Chebotarov Ruslan – PhD Student MST Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: ruslan.chebotarov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1191-775X>

Способи підвищення якості друку для цифрової друкарської машини Konica Minolta 6085

О.В. Вовк, І.Б. Чеботарьова, Д.О. Донський, Р.І. Чеботарьов

Анотація

В роботі проведено дослідження особливостей використання різних растрових структур з різною формою точки з урахуванням типових рекомендацій виробників друкарських машин та особливостей друкарської машини Konica Minolta 6085 для підвищення якості друкованої продукції. Застосування різних технологій растрування дозволяють не тільки вирішувати класичні проблеми утворення муару, зернистості, поліпшення плавності друкування напівтонів тощо, але й більш специфічні задачі. Застосування різних форм растрових точок в цифровому друці можна використовувати для розширення колірної гами; комбінація стохастичного растрування, різних форм точок та високої лініатури дозволяє імітувати різні друкарські процеси і робити більш якісні кольоропроби. Для оцінки якості друку розроблено показники якості цифрового друку та зроблено кваліметричне та експертне оцінювання зразків. За результатами оцінювання розроблені рекомендації щодо вибору видів растрів за видами оригіналів та за матеріалами.

Ключові слова: цифровий; друк; оцінка; якість; стохастичний; растр; растрування; лініатура.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Варша З.Л. (Warsza Z.L.)	5	Мощенко І.О. (Moshchenko I.O.)	72
Вовк О.В. (Vovk O.V.)	82	Медведовська Я.С. (Medvedovska Ya.S.) ..	26
Григоренко І.В. (Hryhorenko I.V.)	54	Новосьолов О.А. (Novosyolov O.A.).....	39
Григоренко С.М. (Hryhorenko S.M.)	54	Носков М.С. (Noskov M. S.)	65
Дегтярьов А.В. (Degtyarev O.V.)	45	Павезе Ф. (Pavese F.)	14
Донський Д.О. (Donskiy D.O.)	82	Павлик Г.В.(Pavlyk H.V.)	50
Дроздова Т.В. (Drozdova T.V.)	65	Полярус О.В (Poliarus O.V.)	26
Запорожець О.В. (Zaporozhets O.V.)	72	Пухальскі Я. (Puchalski J.)	5
Ключник І.І. (Klyuchnyk I.Iv.)	45	Рожнова Т.Г. (Rozhnova T.G.)	50
Коваль А.О. (Koval A.O.).....	26	Середюк О.Є. (Serediuk O.Ye.).....	60
Коваль О.А. (Koval O.A.).....	26	Смаглюк М.В. (Smahliuk M.V.)	60
Кондратенко В.О. (Kondratenko V.O.)	39	Хомяк Ю.В. (Khomyak Y.V.)	65
Корнев І.К. (Kornev I.K.)	65	Хорошайло Ю.Є. (Khoroshailo Yu.E.)	45
Костенко О.М. (Kostenko O.M.)	50	Хроль Д.В. (Khrol D.V.)	54
Кошовий М.Д. (Koshovyi M.D.)	50	Чебикіна Т.В. (Chebykina T.V.)	50
Лиска С.В. (Lyska S.V.).....	54	Чеботарьова І.Б. (Chebotarova I.B.)	82
Луценко В.О. (Lutsenko V.O.)	45	Чеботарьов Р.І. (Chebotarov R.I.)	82

**Метрологія
та прилади**

**Metrology
and Instruments**

Науково-практичний журнал
2025, № 2

ISSN 2307-2180 (print)
ISSN 2663-9564 (online)

Відповідальний за випуск *О. В. Дегтярьов*
Комп'ютерна верстка *К. І. Кохно*

*Ідентифікатор медіа R30-04584 згідно з рішенням Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення від 23.05.2024 № 1772*

Підписано до друку 20.12.2025. Формат 60x84/8. Ум.-друк. арк. 14,75. Тираж 100 прим. Зам. 1220-25

Адреса редакції: Харківський Національний університет радіоелектроніки
Кафедра ІВТ, пр. Науки, 14, 61166, м. Харків, Україна, тел. + 38 (057) 702-13-31

Віддруковано з готових оригінал-макетів в ФО-П Єфименко С.А.