

Функція невизначеності і міри в задачах вимірювань.

Функция неопределенности и меры в задачах измерений.

The function of uncertainty and measure in measuring tasks.

Анотація. Математична модель у виді векторного випадкового поля, що гомоморфно відображає динаміку змін у просторі і часі значень вимірювальної величини, названа функцією невизначеності вимірювань. Ця модель описує основні фізичні механізми формування інформаційних і заводних сигналів, їх різні комбінації і співвідношення інтенсивностей при вимірюваннях. Наведені міри умовно розділені на два класи: фізичні і ймовірнісні (статистичні). Сучасні вимірювання можуть бути реалізовані інформаційними вимірювальними технологіями (ІВТ) відповідно у форматах ІВТ-1D, ІВТ-2D і ІВТ-3D.

Аннотация. Аннотация. Математическая модель в виде векторного случайного поля, гомоморфного отражает динамику изменений в пространстве и времени значений измеряемой величины, названная функцией неопределенности измерений. Эта модель описывает основные физические механизмы формирования информационных и заводных сигналов, их различные комбинации и соотношения интенсивностей при измерениях. Приведенные степени условно разделены на два класса: физические и вероятностные (статистические). Современные измерения могут быть реализованы информационными измерительными технологиями (ИИТ) соответственно в форматах ИИТ -1D, ИИТ -2D и ИИТ -3D.

Abstract. The general mathematical model of the dynamics of changes in space and time of the values of the measuring value in the form of a vector random field is proposed, which homomorphically reflects the basic properties of various objects, phenomena and processes. Such a model is called the function of uncertainty, spatial-temporal characteristics and parameters of which are the main subjects of measurements. For practical use, the model is presented as the sum of three components: two deterministic multidimensional functions with initial random conditions, namely, integral trend and the sum of periodic harmonic oscillations, as well as a third component whose random character is manifested throughout the measurement process. Such components substantiate and specify the physical nature and mechanisms of the formation of information and interference signals, their various combinations, and the ratio of intensities in measurements. The given measures used in measurements are conditionally divided into two classes: physical (measures of magnitude, space and time) and probabilistic (statistical) measures of the result and characteristics of uncertainty of measurements, metrological reliability of measuring instruments, information protection during measurements. Modern and perspective measurements using the proposed model and their partial cases (reducing the size of measurements) can be realized by information measuring technologies (ICT), respectively, in the formats of IVT-1D, IVT-2D and IVT-3D.

Ключові слова. Концепція невизначеності вимірювань; функція невизначеності вимірювань; фізичні міри; ймовірнісні (статистичні) міри; інформаційні вимірювальні технології.

Ключевые слова. Концепция неопределенности измерений; функция неопределенности измерений; физические меры; вероятностные (статистические) меры; информационные измерительные технологии.

Keywords. Concept of uncertainty of measurements; measurement uncertainty function; physical measures; probabilistic (statistical) measures; information measuring technologies.

Вступ. Проблематика даної доповіді є відомою з давніх часів. Так філософи стверджують, що вимірювання є основним процесом пізнання світу, тобто інструментарієм для вирішення невизначеності при проведенні різного роду досліджень. Природно, що при наявності визначеності проведення вимірювань немає сенсу.

Робоча група Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), до складу якої увійшли експерти міжнародних метрологічних організацій, розробила і опублікувала в 1993 році Керівництво з метрології [1], які стали основою сучасного стандарту оцінювання якості вимірювань в міжнародній практиці. По суті [1] відображає практичну сторону так званої концепції невизначеності вимірювань, і в свою чергу служить своєрідним імпульсом для проведення ряду досліджень при вимірюваннях [2, 3]. Слід відмітити, що основні результати концепції невизначеності вимірювань дають можливість практично оцінити статистичними методами опрацювання апостеріорних даних вимірювань, результат і характеристики якості вимірювань. При цьому, теоретичні засади концепції невизначеності вирішені не в повній мірі. Так, наприклад, не розглядаються апіорні фізичні математичні моделі інформаційних сигналів при вимірюваннях, включаючи моделі динаміки зміни у просторі і часі значень вимірювальної величини, методи вимірювань і прогнозовані апіорні результати вимірювань. Відомо, що по результатам теоретичного обґрунтування процесу вимірювань розробляється і конкретизується програма і методика проведення вимірювального експерименту, реалізація якого і забезпечує успіх вимірювань. При використанні концепції невизначеності питання конкретизації застосування на ряду з методами теорії ймовірності і математичної статистики (статистичними) інших методів є також невирішеним.

Мета доповіді і постановка досліджень. На основі результатів науково-технічних задач вимірювань запропонувати загальну математичну модель динаміки змін у просторі і часі значень вимірювальної величини, як функцію невизначеності, обґрунтувати застосування і провести класифікацію відповідальних мір при вимірюваннях і визначити інформаційні вимірювальні технології їх реалізації.

Основний текст. При вимірюваннях вирішуються три проблеми [4-13]:

1. *Проблеми відображення* – здійснення гомоморфного відображення у просторі і часі основних властивостей різних об'єктів досліджень, явищ, процесів (емпіричних систем) у числову систему з використанням операцій порівняння.

2. *Проблеми єдності* мір для забезпечення їх однорідності у просторі, стаціонарності у часі при визначенні кількісного змісту вимірювальної величини з заданою точністю за результатами вимірювань у різних місцях простору і в різний час.

3. *Проблеми захисту* (безпеки) інформації при вимірюваннях з використанням методів, засобів та інформаційного забезпечення захисту інформації при формуванні, опрацюванні, реєстрації і подання замовнику (або в інші системи, наприклад, системи управління) даних і результатів вимірювань з метою мінімізації впливу, як природних завад, так і навмисних загроз і несанкціонованого доступу до інформації.

При вирішенні таких проблем використовуються різні моделі сигналів об'єктів досліджень. У зв'язку зі зростанням складності завдань вимірювань постійно збільшується і розмірність моделей, в тому числі і за рахунок просторових координат x , $(x, y) = \mathbf{p}$, $(x, y, z) = \mathbf{r}$. При вимірюваннях значень і просторово-часових характеристик сигналів об'єктів досліджень використовуються наступні моделі, загальний вид яких в залежності від аргументів наведено в табл. 1.

В якості загальної математичної моделі значень вимірювальної величини запропоновано векторне випадкове поле

$$A(\omega; \mathbf{r}; t) = (u_1(\omega_{01}; \mathbf{r}; t), u_2(\omega_{02}; \mathbf{r}; t), \xi_3(\omega_3, \mathbf{r}, t)), \quad \omega = (\omega_{01}, \omega_{02}, \omega_3), \mathbf{r} \in G \subseteq R^3, t \in T \quad (1)$$

як багатовимірною функцією невизначеності, просторово-часові характеристики і параметри

Таблиця 1

Аргументи Види функцій	$\omega \in \Omega$ $t \in T$	$\omega \in \Omega$ $x \in R$ $t \in T$	$\omega \in \Omega$ $(x, y) = \mathbf{p} \in R^2$ $t \in T$	$\omega \in \Omega$, $(x, y, z) = \mathbf{r} \in R^3$ $t \in T$
Детерміновані	число $\alpha \in R$, одновимірною функція $u(t) \in R$	двовимірною функція $u(x, t) \in R$	тривимірною функція $u(\mathbf{p}, t) \in R$	чотиривимірною функція $u(\mathbf{r}, t) \in R$
Детерміновані з випадковими початковими умовами	число $u(\omega_0) \in R$, одновимірною функція $u(\omega_0, t) \in R$	двовимірною функція $u(\omega_0, x, t) \in R$	тривимірною функція $u(\omega_0, \mathbf{p}, t) \in R$	чотиривимірною функція $u(\omega_0, \mathbf{r}, t) \in R$
Випадкові	величина $\xi(\omega) \in R$, процес $\xi(\omega, t) \in R$	одновимірне просторове поле $\xi(\omega, x, t) \in R$	двовимірне просторове поле $\xi(\omega; \mathbf{p}; t) \in R$	тривимірне просторове поле $\xi(\omega; \mathbf{r}; t) \in R$

якої є основними предметами вимірювань. Така модель враховує як інформаційні так і завадні сигнали їх різні комбінації і співвідношення інтенсивностей при вимірюваннях

Одна із конструктивних моделей $A(\omega; \mathbf{r}; t)$ представлена адитивною сумішшю компонент у виді

$$A(\omega; \mathbf{r}; t) = u_1(\omega_{01}; \mathbf{r}; t)I(\mathbf{r}_1, t_1) + u_2(\omega_{02}; \mathbf{r}; t)I(\mathbf{r}_2, t_2) + \xi_3(\omega_3, \mathbf{r}, t)I(\mathbf{r}_3, t_3). \quad (2)$$

Компоненти моделей (1) і (2) описують наступні характерні зміни динаміки значень вимірювальної величини у просторі і часі: $u_1(\omega_{01}; \mathbf{r}; t)$ – детерміновані інтегральні зміни у середньому (трендова компонента) з початковими випадковими умовами в момент $t_0 \in T$, де t_0 - початок процесу вимірювань; $u_2(\omega_{02}; \mathbf{r}; t)$ – детерміновані періодичні зміни, у більшості випадків, у виді суми періодичних гармонічних коливань (гармонічна компонента) з початковими випадковими умовами в момент $t_0 \in T$; $\xi_3(\omega_3, \mathbf{r}, t)$ – випадковий характер змін на протязі всього процесу вимірювань (випадкова компонента).

Індикаторні функції в моделі (2) визначаються так

$$I(\mathbf{r}_i, t_i) = \begin{cases} 1, \mathbf{r}_i \in G_i, t_i \in T_i, \\ 0, \mathbf{r}_i \notin G_i, t_i \notin T_i \end{cases} \quad G_i \subseteq G; T_i \subseteq T; i = \overline{1, 3} \quad (3)$$

і враховують вклад вказаних вище компонент у загальну модель $A(\omega; r; t)$ з відповідними обмеженнями у просторі і часі.

Математичне сподівання – перший початковий момент моделі (2) визначається так

$$M\{A(\omega; r; t)\} = M\{u_1(\omega_{01}; r; t)\}I(r_1, t_1) + M\{u_2(\omega_{02}; r; t)\}I(r_2, t_2) + M\{\xi_3(\omega_3, r, t)\}I(r_3, t_3) \quad (4)$$

де $M\{\dots\}$ – оператор математичного сподівання випадкових компонент.

Частинні випадки моделі (2), коли в якості компонент використовуються математичні об'єкти меншої розмірності (по кількості аргументів) наведені у таблиці 1.

Розглянемо використання різних видів мір при проведенні вимірювань.

Використання міри. Вирішення завдання забезпечення однорідності і стаціонарності міри для кожного конкретного випадку вимірювання має свою специфіку і характерні особливості. В той же час можна виділити наступні види мір:

$M1$ – міра одиниці вимірювальної величини (при $n(n > 1)$ величин $M1-n$ мір), яка реалізується у більшості випадків фізичними еталонами одиниць системи СІ;

$M2$ – міра одиниці просторових координат місця проведення вимірювань (м);

$M3$ – міра одиниці часу проведення вимірювань (с);

$M4$ – ймовірнісна (статистична) нормована міра результату і характеристик невизначенності вимірювань при статистичному опрацюванні даних вимірювань;

$M5$ – ймовірнісна (статистична) нормована міра метрологічної надійності засобів вимірювань;

$M6$ – комплексна, у більшості випадків ймовірнісна міра захисту інформації конкретного процесу вимірювань.

Природна класифікація мір при проведенні вимірювань виглядає так:

- до фізичних мір відносяться міри $M1, M2$ і $M3$;
- до нефізичних мір, у більшості випадків ймовірнісних як функцій множин – скінченного об'єму N даних вимірювань, відносяться міри $M4, M5$ і $M6$.

На рис. 1 зображена схематична ілюстрація використання мір при вимірюваннях.

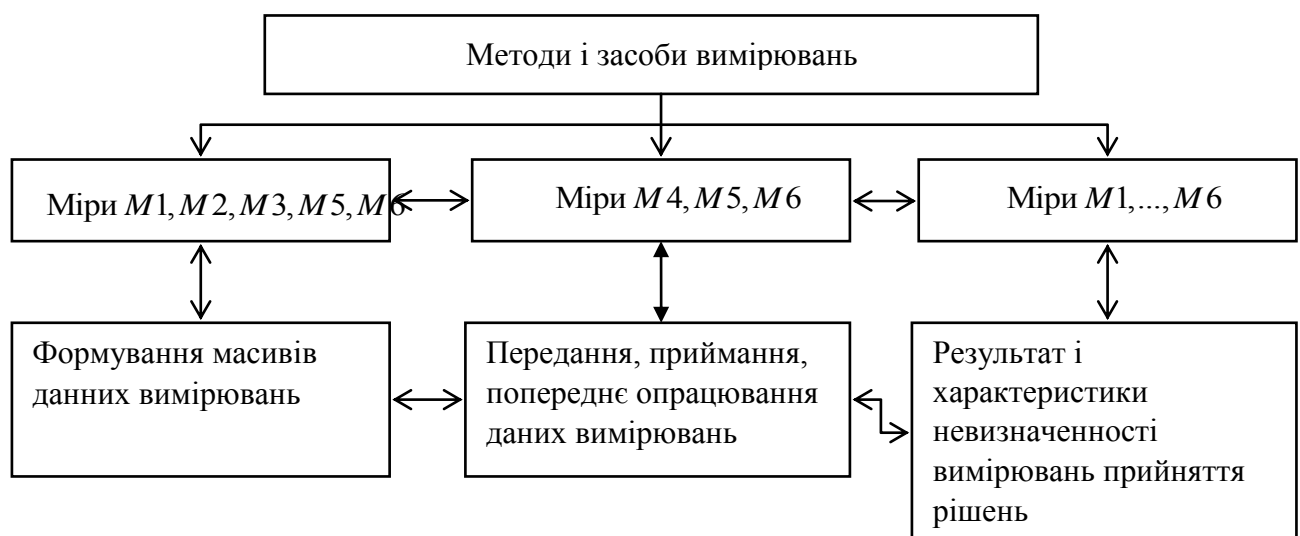


Рис 1. Схематична ілюстрація використання мір при вимірюваннях

Інформаційні вимірювальні технології. Виділення класу інформаційних вимірювальних технологій (ІВТ) на множині інформаційних технологій (ІТ) аналогічно виділенню класу ІВС на загальній множині технічних систем.

В теорії ІВС динаміка розвитку ІВТ на сьогодні є найбільш інтенсивною і цей факт обумовлений наступним:

- складністю завдань вимірювань, збільшення інформативності вимірювань;
- розширенням кола предметних областей використання результатів вимірювань;
- необхідністю удосконалення відомих і створення нових сенсорних підсистем ІВС для перетворення досліджуваних величин;
- необхідністю розширення формату і ресурсів вимірювальних експериментів при дослідженні динаміки у просторі і часі, динаміки стану і режимів функціонування технічних об'єктів і систем, фізичних явищ і процесів.

Таблиця 2

Види технологій	Види моделей вимірювання сигналів
Інформаційна технологія вимірювань ID (ІТВ–ID)	$u, u(\omega_0), u(\omega_0, x, t), \xi(\omega), \xi(\omega, t); \xi(\omega; x; t)$
Інформаційна технологія вимірювань 2D (ІТВ–2D)	$u(\rho, t), u(\omega_0, \rho, t), \xi(\omega, \rho; t)$
Інформаційна технологія вимірювань 3D (ІТВ–3D)	$u(\mathbf{r}, t), u(\omega_0, \mathbf{r}, t), \xi(\omega, \mathbf{r}; t)$

В табл. 2 наведена класифікація видів ІВТ, яка базується на інтегральній ознаці розмірності первинної вимірювальної інформації – вимірювального сигналу (одновимірні і багатовимірні). Ця класифікація має аналоги в класі відомих ІТ і визначає потужність і ресурси проведення вимірювань.

Наведена класифікація відповідає частинному випадку вимірювань однієї вимірюваної величини. Більш складним є випадок одночасного вимірювання значної кількості однорідних і/або різнорідних величин, але методологія створення і представлення моделей лишається незмінною для кожної вимірюваної величини.

Заклучна частина. Запропоновано загальну математичну модель динаміки змін у просторі і часі значень вимірювальної величини у вигляді векторного випадкового поля, яка гомоморфно відображає основні властивості різних об'єктів, явищ та процесів. Таку модель названо функцією невизначеності, просторово-часові характеристики і параметри якої є основними предметами вимірювань. Для практичного використання модель представлена як сума трьох компонентів: двох детермінованих багатовимірних функцій з початковими випадковими умовами, а саме інтегральною трендовою і сумою періодичних гармонічних коливань, а також третьої компоненти, випадковий характер якої проявляється на протязі всього процесу вимірювань. Такі компоненти обґрунтовують та конкретизують фізичну природу та механізми формування інформаційних і завданних сигналів, їх різні комбінації і співвідношення інтенсивностей при вимірюваннях. Наведені міри, що використовуються при вимірюваннях, умовно діляться на два класи: фізичні (міри величини, простору і часу) та ймовірнісні (статистичні) - міри результату та характеристики невизначеності вимірювань, метрологічної надійності засобів вимірювань, захисту інформації під час вимірювань. Сучасні та перспективні вимірювання з використанням запропонованої моделі та їх частинних випадків (зменшення розміру вимірювань) можуть бути реалізовані інформаційними вимірювальними технологіями (ІВТ), відповідно, у форматах ІВТ-1D, ІВТ-2D та ІВТ-3D.

Список використаних джерел.

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement/First edition – ISO/Switzerland. 1993/– 101 p.
2. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях. Учеб. пособие: – Харьков, Консум, 2002 – 256 с.
3. В.Д.Ціделко, Н.А.Яремчук. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання. - Київ: «Політехніка», 2002. - 176 с.
4. Орнатський П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники.– К.; Вища школа, 1983.– 455 с.
5. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник у 2-х томах/ М. Дорожевец, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Боряк, А. Ковальчак.– Львів: вид-цтво НУ «Львівська політехніка». 2005.– 1300с.
6. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Г. Володарський, В.В. Грабко.– Херсон: Олді-плюс, 2013.,– 583 с.
7. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем. Підручник. В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Еременко та ін.; за ред. чл.– кор. НАН України В.П. Бабака/2-е вид. перероб. і доп.– Київ, Ун-т новітніх технологій, НАУ, 2017.–496с.
8. Бабак В.П. Теоретичні основи захисту інформації. Підручник. ~ Київ, книжкове вид-во НАУ. 2008.–752с.
9. Марченко Б.Г. Щербак Л.М. Сучасна концепція побудови теорії вимірювань/ Доповіді НАН України. 1999, №10. с. 85-88;
10. Марченко Б.Г. Щербак Л.М. Основи теорії вимірювань./праці ін-туту ел-динаміки НАН України. Електроенергетика.–К., 1999. с.221-230.
11. Єременко В.С., Куц Ю.В. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. / Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокійчук В.М., Самойліченко О.В. – К.: НАУ, 2015.–321 с.
12. Володарський Є.Т. Статистична обробка даних: навч. посібник / Є.Т. Володарський, Л.О. Кошева, –К.: Книжкове видавництво НАУ, 2008. 308 с.
13. R.L. Kashyap, A. Ramachandra Rao Dynamic Stochastic Models from Empirical Data /– Academic Press New York, San Francisco, London: 1976. – 384 p.

References.

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement/First edition – ISO/Switzerland. 1993/– 101 p.
2. Zaharov I.P., Kukush V.D. Teorija neopredelennosti v izmerenijah. Ucheb. posobie: – Har'kov, Konsum, 2002 – 256 s.
3. V.D.Cidelko, N.A.Jaremchuk. Neviznachenist' vimirjuvannja. Obrobka danih i podannja rezul'tatu vimirjuvannja. - Kiïv: «Politehnika», 2002. - 176 s.
4. Ornats'kij P.P. Teoreticheskie osnovy informacionno-izmeritel'noj tehniki.– K.; Vishha shkola, 1983.– 455 s.
5. Osnovi metrologii ta vimirjuval'noï tehniki: pidruchnik u 2-h tomah/ M. Dorozhevec, V. Motalo, B. Stadnik, V. Vasiljuk, R. Borjak, A. Koval'chak.– L'viv: vid-ctvo NU «L'vivs'ka politehnika». 2005. – 1300s.
6. Osnovi metrologii ta elektrichnih vimirjuvan': pidruchnik / V.V. Kuharchuk, V.Ju. Kucheruk, Є.G. Volodars'kij, V.V. Grabko.– Herson: Oldi-pljus, 2013.,– 583 s.
7. Teoretichni osnovi informacijno-vimirjuval'nih sistem. Pidruchnik. V.P. Babak, S.V. Babak, V.S. Eremenko ta in.; za red. chl.– kor. NAN Ukraïni V.P. Babaka/2-e vid. pererob. i dop.– Kiïv, Un-t novitnih tehnologij, NAU, 2017.–496s.
8. Babak V.P. Teoretichni osnovi zahistu informacii. Pidruchnik. ~ Kiïv, knizhkove vid-vo NAU. 2008.–752s.

9. Marchenko B.G. Shherbak L.M. Suchasna koncepcija pobudovi teorii vimirjuvan'/ Dopovidi NAN Ukraïni. 1999, №10. s. 85-88;
10. Marchenko B.G. Shherbak L.M. Osnovi teorii vimirjuvan'./praci in-tutu el-dinamiki NAN Ukraïni. Elektroenergetika.–K., 1999. s.221-230.
11. Cremenko V.S., Kuc Ju.V. Statistichnij analiz danih vimirjuvan': navch. posib. / Cremenko V.S., Kuc Ju.V., Mokijchuk V.M., Samojlichenko O.V. – K.: NAU, 2015.–321 s.
12. Volodars'kij C.T. Statistichna obrobka danih: navch. posibnik / C.T. Volodars'kij, L.O. Kosheva, –K.: Knizhkovе vidavnictvo NAU, 2008. 308 s.
13. R.L. Kashyap, A. Ramachandra Rao Dynamic Stochastic Models from Empirical Data /– Academic Press New York, San Francisco, London: 1976. – 384 p.