DOI 10.34185/1562-9945-2-145-2023-11

УДК 519.281: 621.317.088

В.У. Ігнаткін, В.С .Дудніков, Т.Р. Лучишин, С.В. Алексєєнко,

О.П. Юшкевич, Т.П. Карпова, Т.С. Хохлова, Ю.С. Хомош, В.А. Тіхонов

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ПРАВИЛЬНОСТІ ВИБОРУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗА ВИЗНАЧЕНИМ КРИТЕРІЄМ ЗАСОБІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ОБ'ЄКТІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Інформаційний підхід до вирішення задач спостережень та контролю до теперішнього часу, не використовується. В основі теорії вимірювань лежить поняття про ентропію випадкових величин - як міри їх невизначеності (множини сукупностей їх можливих значень). Чим більше значень може приймати дискретна випадкова величина, чи чим більший діапазон безперервної випадкової величини, тім – більша їх ентропія. Кількість інформації, яка одержується при вимірюванні, контролі, дослідженні відповідає зменшенню ентропії від значення, котре характеризує невизначеність, яка залишається після одержання результату вимірювання деяких параметрів об'єктив, явищ тощо. Говориться про зв'язок точності, енерговитрат та швидкодії засобів вимірювальної техніки. Висвітлені питання визначення порогу гранично можливої точності вимірювань фактичних величин, а також одержання узагальнюючих інформаційно-енергетичних співвідношень, які дозволяють оптимізувати процедуру вибору основних показників якості засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). При цьому, роблячи спробу все точніше визначити значення вимірювальної величини, ми на деякому етапі неминуче зіткнемося з принциповою неможливістю подальшого їх уточнення, яке пов'язано, у кінцевому рахунку, з фізично можливим ступенем визначеності (на відміну від ентропії, яка характеризує невизначеність, і яка зветься нехентропією) будь якої вимірювальної величини, яка обумовлена чи її особистою дискретністю (наприклад, при вимірюванні числа атомів будь-якої речовини у суміші безглуздо говорити про точність підрахунку, яке дорівнює 0,1 чи 0,01 атому) чи її тепловими (молекулярними) флуктуаціями. Ця межа визначеності у мікросвіті відомий як «Правило невизначеності Гейзенберга». У статті запропоновано модель оцінювання та ефективного використання спостереження та контролю об'єктів різної природи. Запропоновано "інформаційний підхід" до вирішення задач вибору та використання засобів вимірювальної техніки в умовах переходу від традиційних метрологічних показників точності ЗВТ до інформаційних. Приведено приклад вибору ЗВТ і кількості вимірів цим ЗВТ.

Ключові слова: модель, інформація, ефективність, невизначеність, випадкова величина

Постановка задачі

Розробити модель оцінювання правильності вибору та ефективного використання (за визначеним критерієм) засобів вимірювальної техніки.

Викладення основного матеріалу

Деякі елементи інформаційної теорії вимірів

Інформаційні підходи до вирішення загальних проблем вимірювань та вдосконалення вимірювальної техніки, розвинені в 60-70-х роках у роботах вчених Л. Бріллюена, Новицького П.В, Темнікова Ф.Є., Цапенко М.П., Глушкова В.М. і інших [1-13], до теперішнього часу в метрологічній практиці, по суті, не використовуються. Це пояснюється тим, що в ході дослідження і практичного випробування не виявилося скільки-небудь помітних переваг інформаційних підходів, заради яких варто було б ламати традиції, що склалися. Проте вони представляють безперечний інтерес як один із можливих напрямів оцінок узагальнених характеристик якості вимірювальної інформації та технічних засобів її одержання.

В основі інформаційної теорії вимірів лежить поняття про ентропію випадкової величини, як заходи її невизначеності (множинної сукупності її можливих значень) Чим більше - значень може приймати дискретна випадкова величина або чим більше діапазон безперервної випадкової величини, тим більше - їх ентропія [14].

Згідно з К. Шенноном, ентропія H дискретної випадкової величини X' , яка може набувати n значення (i = 1,2,..., /,... , n) з відповідними ймовірностями P_i, виражається як

$$H(X') = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log P_i. \tag{1}$$

Ентропія безперервної випадкової величини X, яка має щільність розподілу p (x), визначається співвідношенням

$$H(X) = -\int_{x_н}^{x_в} p(x) \log p(x) dx, \tag{2}$$

де $x_н$, $x_в$ — нижня та верхня межі діапазону значень величини X.

Залежно від вибору основи логарифму у формулах (1) і (2) ентропія може виражатися в дитах (при використанні десяткових логарифмів), у бітах (для двійкових логарифмів) або в нитах (для натуральних логарифмів).

Відповідно до загальних положень теорії інформації, запропонованих і обґрунтованих К. Шенноном, кількість інформації q, що отримується при вимі-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

рюванні X (або X'), дорівнює різниці апріорної (до вимірювань) H (X) і апостеріорної (після отримання результату вимірювань – $x_р$) – $H(X/x_р)$ ентропії цієї (вимірюваної) величини, тобто.

$$q = H(X) - H\left(X/x_p\right). \qquad (3)$$

Отже, кількість інформації, одержуваної при вимірі, відповідає зменшенню ентропії від значення H (X), яке характеризує невизначеність вимірюваної величини перед вимірюванням, до значення $H(X/X_р)$, яке характеризує решту після отримання результату $x_р$ невизначеність .

Тобто. у разі (з загальних позицій теорії інформації) вимір може трактуватися як ,.скорочення області невизначеності вимірюваної величини”.

Величину $H(X/X_Р)$ називають умовною ентропією (за умови, що отримано $X_Р$).

Нехай до проведення вимірювань було відомо, що величина X, що вимірюється, може приймати значення в діапазоні від $x_н$ до $x_в$ (наприклад, робочий діапазон показань вимірювального приладу) і ймовірність значень X в цьому діапазоні однакова, тобто

$$p(x) = \frac{1}{x_в - x_н}.$$

Тоді відповідно до формули (2) вихідна (апріорна) ентропія дорівнюватиме

$$H(X) = -\int_{x_н}^{x_в} \frac{1}{x_в - x_н} \log \frac{1}{x_в - x_н}\, dx = \log\,(x_в - x_н). \qquad (4)$$

Після проведення вимірювання та отримання результату $x_р$ ми можемо стверджувати, що вимірювана величина (її дійсне значення) лежить у межах від $x_р - \Delta_н$ до $x_р + \Delta_в$, де $\Delta_н$, $\Delta_в$ — нижня та верхня межі похибки вимірювання Δ. Приймемо (для наочності висновків), що похибка лежить у межах $\pm\Delta$ і щільність розподілу значень –

$$p(\Delta) = \frac{1}{2\Delta}.$$

Тоді умовна ентропія, що залишилася після отримання результату $x_р$, дорівнюватиме:

$$H(X/X_p) = \int_{x_p-\Delta}^{x_p+\Delta} \frac{1}{2\Delta} \log \frac{1}{2\Delta}\, dx = \log 2\Delta . \qquad (5)$$

Отже, отримана при вимірюванні кількість інформації, на підставі формули (3), складе

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

$$q = \log(X_B - X_H) - \log 2\Delta = -\log\frac{2\Delta}{X_B - X_H}. \quad (6)$$

Тобто кількість інформації, отримана при вимірюванні, дорівнює негативному значенню логарифму наведеної до діапазону вимірювань похибки їх результату.

У заміні операції поділу Δ на ($x_в$ – $x_н$), що використовується при визначенні привід денної похибки, на операцію віднімання вихідної і невизначеної, що залишилася, ^ характеризуються відповідними значеннями ентропії, і полягає основ-; ний прийом аналізу інформаційної теорії вимірів.

Неважко показати, що умовна ентропія величини, що підкоряється нормальному розподілу із щільністю $P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ дорівнює

$$H_H(X / X_P) = \log(\sqrt{2\pi e}\,\sigma). \quad (7)$$

Як видно з порівняння формул (5) та (7) умовна ентропія для нормального розподілу похибки відрізняється від умовної ентропії рівномірного розподілу лише твором, що стоїть під знаком логарифму. Звідси випливає висновок про те, що з інформаційної точки зору, результат, що має нормальний випадок похибки, дасть таку ж кількість інформації, як і результат з рівномірним розподілом похибки, якщо тільки $2\Delta = \sqrt{2\pi e}\,\sigma$. При цьому дисперсія рівномірного розподілу на порядок перевищує дисперсію нормального розподілу.

Зазначене дозволяє ввести поняття про якусь узагальнену характеристику точності вимірювань (і засобів вимірювань) — ентропійну похибку. При цьому ентропійною похибкою вважається похибка з рівномірним розподілом, яка вносить таку ж дезінформаційну дію (забезпечує таку ж остаточну невизначеність), як і похибка з цим (реальним) законом розподілу.

Математично ентропійне значення похибки, що визначається як половина інтервалу невизначеності, виражається так:

$$\Delta_є = \frac{1}{2} e^{H(X/X_P)}. \quad (8)$$

Залежність між ентропійним і середнім квадратичним значеннями похибки може бути представлена як $\Delta_є = K_є \sigma$, де коефіцієнт $K_є = \frac{\Delta_є}{\sigma}$, що залежить від виду закону розподілу похибки, називається його ентропійним коефіцієнтом.

Найбільшою ентропією при заданому значенні має нормальний розподіл. Тому він має найбільший, гранично можливий .ентропійний коефіцієнт, рів-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ний виходячи з співвідношень (7) і (8) (для натуральних логарифмів): $K_{eH} = \sqrt{\frac{\pi e}{2}} = 2,07$.

Саме тому досить часто в невизначеній ситуації (за відсутності доступу до даних) як модель розподілу похибки при заданій дисперсії приймається нормальний розподіл.

Для рівномірного розподілу $\sigma = \Delta\sqrt{3}$, та $K_{eH} = \sqrt{3} \approx 1,73$.

Аналогічним чином можуть бути обчислені значення K_{eH} для будь-яких інших законів розподілу.

Зв'язок точності, енергоспоживання та швидкодії засобів вимірювань. Це питання, досить повно розроблене в рамках інформаційної теорії вимірювань, має, мабуть, на сьогоднішній день найбільш істотне значення для приладу та практики. Практично важливими результатами його рішення є по-перше, визначення порога гранично можливої точності вимірювання фактичних величин і, по-друге, отримання узагальнених інформаційно-енергетичних співвідношень, що дозволяють оптимізувати процедуру вибору основних показників якості засобів вимірювання.

Намагаючись все точніше і точніше визначити значення вимірюваної величини, ми на якомусь етапі неминуче зіткнемося з принциповою неможливістю подальшого його уточнення. Це пов'язано зрештою з фізично можливим ступенем певності (на відміну від ентропії, що характеризує невизначеність, званої нехентропією) будь-якої вимірюваної величини, обумовленої або її власною дискретністю (наприклад, при вимірюванні числа атомів будь-якої речовини в суміші без свідомо говорити про точність відліку, що дорівнює 0,1 або 0.01 атома), або її тепловими (молекулярними) флуктуаціями.

Ця межа визначеності в мікросвіті відома як „правило невизначеності Гейзенберга”.

Енергія термодинамічної флуктуації молекулярних явищ визначається рівнянням Найквіста

$$N_{ш} = 4K\theta\Delta f\,, \tag{9}$$

де $N_{ш}$ - потужність теплових флуктуацій; $K \approx 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж*К$^{-1}$ - постійна Больцмана; θ – абсолютна температура; Δf – смуга частот випадкових флуктуацій, до якої належить знайдена потужність.

Якщо за час (t) буде вироблено (n) окремих відліків вимірюваної величини, то потужність флуктуацій середнього значення буде зменшуватися обернено пропорційно числу n, тобто. буде рівна

$$\overline{N_ш} = \frac{4K\theta\Delta f}{n}.$$

Однак таке зменшення потужності флуктуаційних перешкод відбуватиметься лише до тих пір, поки відліки, що усереднюються, незалежні один від одного. Відповідно до теорії Котельникова [17,18] , число незалежних відліків випадкової функції з граничною частотою Δf за час (t) дорівнює n= $2\Delta ft$.

Тоді максимально можливе зменшення потужності флуктуаційної перешкоди при усередненні за час t визначиться виразом

$$\overline{N_{ш\min}} = \frac{4K\theta\Delta f}{2\Delta ft} = \frac{2K\theta}{t}. \tag{10}$$

Як відомо, тепловий шум підпорядковується нормальному закону з дисперсією $\sigma_ш^2 = N_ш$.

Отже, мінімальна відносна (віднесена до робочого діапазону)

і середня квадратична похибка результату вимірювань, обумовлена тепловими флуктуаціями вимірюваної величини, дорівнюватиме:

$$\delta_{ш\min} = \sqrt{\frac{N_{ш\min}}{N}} = \sqrt{\frac{2K\theta}{N_t}} \tag{11}$$

та відносна ентропійна похибка:

$$\delta_{\epsilon\min} = \sqrt{\frac{2\pi e}{2}} * \sqrt{\frac{2K\theta}{N_t}}, \tag{12}$$

де N – повна потужність несучого процесу (потужність, що відбирається засобом вимірювань від об'єкта, що вимірюється).

Співвідношення (11) і (12), справедливі для будь-яких вимірюваних величин, будь-яких процесів та засобів вимірювань, визначають вихідну оптимального класу точності нехентропію вимірюваної фізичної величини при відмінній від абсолютного нуля температурі та гранично можливу точність її виміру.

Теплові перешкоди залежать від значень вимірюваної величини, тобто. є суто адитивними. За цих умов максимальна кількість інформації (у дитах), яка може містити вимірювальний сигнал з енергією N_t, на підставі формули (6) дорівнює

$$q_{\max} = \lg \frac{1}{2}\sqrt{\frac{N_t}{\pi e K\theta}}. \tag{13}$$

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Логарифмуючи всі постійні величини (π, e, k), що входять до формули (13). отримаємо остаточну залежність між кількістю інформації в дитах, енергія в джоулях і абсолютною температурою в Кельвінах:

$$q_{\max} = 10{,}66 + \frac{1}{2}\lg\frac{N_t}{\theta}. \qquad (14)$$

Основне значення співвідношення полягає в наступному. Передача інформації від одного об'єкта до іншого, наприклад від об'єкта вимірювань до вимірювального пристрою, може відбуватися тільки шляхом їхньої енергетичної взаємодії. При відсутності обміну енергією між об’єктами ЗВТ передача інформації, а отже і вимір – неможливі.

При збільшенні енергетичного обміну зросте і можливість отримання більшої інформації, а при заданому значенні енергетичного обміну обмежена кількість отриманої та переданої інформації.

Реальна точність засобів вимірювань, обумовлена їх власними властивостями, у всіх випадках буде меншою, ніж характеризується мінімально можливою ентропійною похибкою $\delta_{e\min}$. Тому, як показник «метрологічної досконалості» засобів вимірювань, можна ввести відношення $\alpha=\frac{\delta_e}{\delta_{e\min}}$, де δ_e - реальне ентропійне значення похибки засобів вимірювань, яке називається показником втрати точності.

Величину $\eta_e = \frac{1}{\alpha^2}$, яка означає відносну частину корисної використаної енергії, яка відібрана від об’єкту, називають енергетичним ККД засобів вимірювання

Поряд з цими показниками, що характеризують досконалість використовуваної вимірювальної апаратури, інформаційна теорія вводить і показник інформаційної досконалості самого процесу вимірювання. Як такий показник використовується відношення кількості інформації q, реально одержуваного в результаті вимірювання, до межі кількості інформації $q_{\max}$ обмеженого тепловими флуктуаціями вимірюваної величини при заданих умовах вимірювань (абсолютної температурі середовища θ, тобто, показник:

$$\eta_n = \frac{q}{q_{\max}}.$$

Цей показник отримав назву інформаційного ККД процесу виміру.

Звивши воєдино розглянуті показники, на підставі (12) отримаємо загальне співвідношення, що зв'язує точність δ_e, енергоспоживання та швидкодію t засобів вимірювання:

$$\delta_e^2 N_t = \frac{w_ш}{\eta_e}, \qquad (15)$$

де $w_ш = K\theta\ \pi e$ - енергія теплового шуму при абсолютній температурі θ (наприклад, при нормальній температурі θ=293°К та $w_ш = \pi$*1,38*10^{-23}*293= = 3,5*10^{-20}$[Дж]$.

Як видно із співвідношення (15), вдосконалення засобів вимірювань за яким-небудь із показників (точності, енергоспоживання або швидкодії) можливе лише за рахунок підвищення їх енергетичного ККД або за рахунок зниження (погіршення) інших показників. Останній випадок є більш типовим, оскільки підвищення енергетичного ККД приладів (як і ККД будь-яких досить досконалих енергетичних систем) дуже складно.

Такими є деякі елементи інформаційної теорії вимірювань та вимірювальних пристроїв, знання яких необхідне, на наш погляд, сучасному метрологу хоча б для орієнтації у складних дискусійних питаннях метрологічної теорії і практики.

Модель оцінювання правильності вибору та ефективного використання засобів вимірювальної техніки (ЗВТ)

Для обґрунтування оптимальної кількості вимірювань та вибору ЗВТ, що забезпечують необхідну точність, характеристики надійності, мінімальні витрати на вимірювання параметрів якості продукції та робочих ЗВТ, необхідно математично описати процес вимірювань, розробити критерії оцінок цього процесу [15-17].

Математично процес вимірів можна описати наступним чином. Виконується Z вимірювань одного й того ж контрольованого параметра β, в результаті чого виходить ряд значень β_1, β_2, ..., β_z.

Дійсне значення параметру знаходиться в межах :

$$\beta_{ср} - \Delta \le \beta \le \beta_{ср} + \Delta, \qquad (16)$$

з довірчою ймовірністю P'. Довірчий інтервал Δ, пов'язаний з кількістю вимірювань Z та довірчою ймовірністю P' наступним чином:

$$\Delta = \frac{\sigma' t_p}{\sqrt{z-1}}, \qquad (17)$$

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

де $\sigma^{'}$ - середнє квадратичне відхилення похибки вимірювання; t_p - параметр, який залежить від виду закону розподілу похибки вимірювань: P' та Z.

Таким чином, за результатами вимірювань неможливо визначити дійсне значення параметра β, а можна лише вказати інтервал, в якому з певною ймовірністю P' воно знаходиться.

Нехай необхідно забезпечити довірчий інтервал Δ з довірчою ймовірністю P$^{'}$, тоді можна запропонувати ряд ЗВТ із середніми квадратичними відхиленнями: $\sigma_1^{'}, \sigma_2^{'}, .., \sigma_i^{'}$, яким будуть відповідати кількості вимірювань $z_1, z_2, \ldots, z_i, \ldots$

Цікаво визначити клас точності ЗВТ, що задовольняє цим вимогам Δ, P' деяким оптимальним чином. Припустимо, що критерієм оптимальності вимірювань прийнята питома інформація:

$$h_1 = \frac{I}{z}\left[\frac{бит}{вим.}\right], \tag{18}$$

де $I = \int_{-\infty}^{\infty} \log_2\left[f(t)\right] f(t)dt - \log_2 \Delta$ - кількість інформації для різних законів розподілу під час вимірювання параметра β (табл. 1);

f(t) - щільність розподілу похибки вимірювань.

Таблиця 1

Кількість інформації для різних законів розподілу

Закон розподілу похибок	Щільність розподілу похибки	Інформація про вимірювальний параметр β
Нормальний	$(\frac{1}{\sigma^{'}}\sqrt{2\pi})e^{\frac{-t^2}{2\sigma^{'2}}}$	$\log_2(\sqrt{2\pi e}\frac{\sigma^{'}}{\Delta})$
Рівномірний	$\frac{1}{b-a}$	$\log_2\frac{b-a}{\Delta}$

Назвемо показник h_1 інформаційною ефективністю вимірювань. Оптимальному класу точності ЗВТ буде відповідати максимальне значення інформаційної ефективності. Для заданих значень t_p, Z, P$^{'}$ розраховані за допомогою ЕОМ значення функції h_1 та побудовані графіки, які надані на рис. 1-4, котрі дозволяють вибирати оптимальні по h_1 кількість вимірів та відносний довірчий проміжок $\frac{\Delta}{\sigma^{'}}$ для заданих значень P$^{'}$.

Продемонструємо сказане на прикладі.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Приклад. В ГОСТ 8.051-81 встановлено, що для розмірів від 360 мм до 500 мм (квалітет 1) допустима похибка виготовлення дорівнює 10 мкм, допустима похибка вимірювань складає 3,5 мкм з коефіцієнтом надійності P'=95%. По рис. 4 вибираємо оптимальну (максимум h_1 для P'=95%) кількість вимірів Z дорівнює 5. Далі по рис. 3 вибираємо $\frac{\Delta}{\sigma'}$ і воно дорівнює 1,388. Звідси

$$\sigma' = \frac{\Delta}{1,388} \approx 2,52 мкм$$

Таким чином для номінальних розмірів від 360 мм до 500 мм, здопустимою похибкою 3,5 мкм і P' = 95 % слід вибрати клас точності ЗВТ з σ' = 2,52 мкм і зробити 5 вимірів. При цьому вимір буде проведено найефективніше (у сенсі h_1).

Зазвичай, при проведенні перевірок ЗВТ їхня похибка оцінюється в декількох точках діапазону вимірювань. Звичайно, що ЗВТ слід повіряти тільки в тих точках діапазону, в яких є суттєва ймовірність виходу похибки ЗВТ з поля допуску. Якщо похибка ЗВТ в одній точці діапазону оказалась у межах допусків, то друга точка для повірки повинна бути обрана так, щоб кумулятивна ймовірність виходу погрішності за допуск виявилася в ній більшою за встановлену.

У процесі вимірювання беруть участь оператор та ЗВТ. Аналіз інформаційної ефективності вимірювань показує, що ЗВТ ефективно при кількостях вимірів, великих або рівних двом, наприклад, при довірчій ймовірності P'=0,95; Z = 5. Тобто ми стикаємося з фактом, що ефективне (в сенсі h_1) використання ЗВТ призводить до збільшення тривалості з вимірювання та неефективної роботи операторів. Тому представляється цікавим визначення такої кількості вимірювань, яка призводить до ефективного використання ЗВТ і достатньо задовільної роботи операторів. Для цього збудуємо наступну цільову функцію:

$$Ц = c_{вим} z + c_{ЗВТ}(100 - h_1)\,, \tag{19}$$

де $c_{вим}$ - вартість вимірювань без вартості ЗВТ; Z — кількість вимірів; $c_{ЗВТ}$ - вартість ЗВТ; h_1 - інформаційна ефективність вимірювань, %.

Визначимо оптимальну кількість вимірювань, мінімізуючи цю цільову функцію. Для цього візьмемо похідну від Ц по Z і прирівняємо її до нуля. В результаті ряду нескладних перетворень отримаємо рівняння, з якого можна визначити $Z_{опт}$

$$\frac{dh_1}{dZ} = \frac{1}{2\ln 2 Z_{опт}(Z_{опт} - 1)} - \log_2(\sqrt{2\pi e / t_p}) + \log_2\sqrt{Z_{опт} - 1}\,. \tag{20}$$

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

За допомогою ЕОМ для ряду значень P'(99,9; 99; 95; 90; 50; 10%) та Z (2, 3, ..., 10) можна визначити значення функції. Результати розрахунків

подано у вигляді графіка (рис. 5). З аналізу цього графіка видно, що з P'=90; 95; 99; 99,9 % рівняння (20) має рішення лише у заштрихованій області (див. рис. 5). Крім того, при P = 10 ... 50% функція h_1 досягає свого найбільшого значення при Z = 2, а при P = 90.... 99,9% ми стикаємося з обставиною, що заштрихованої області оптимальних кіл вимірів відповідає область негативних значень інформації, що визначається за формулою.

$$I=\log_2\left(\sqrt{2\pi e}\,\frac{\sqrt{z-1}}{t_p}\right)=2,05+\log_2\left(\frac{\sqrt{z-1}}{t_p}\right). \qquad (21)$$

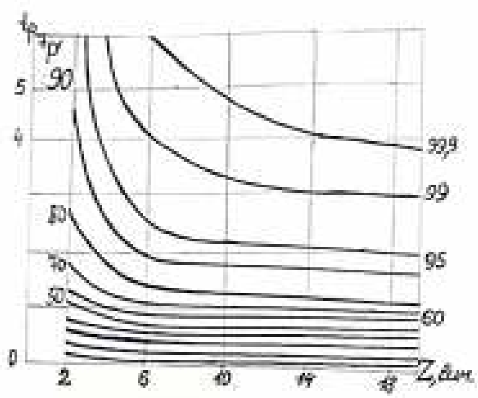

Рисунок 1 – Залежність параметру t_p від кількості вимірів Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

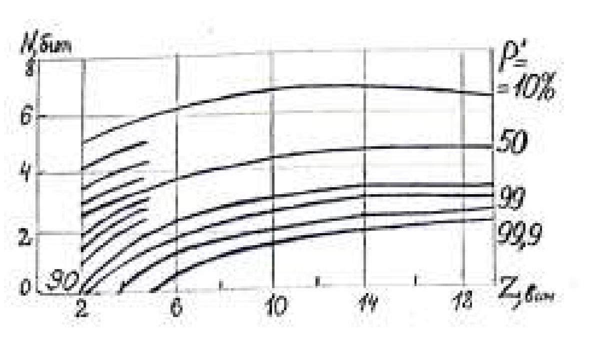

Рисунок 2 – Залежність кількості інформації N від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

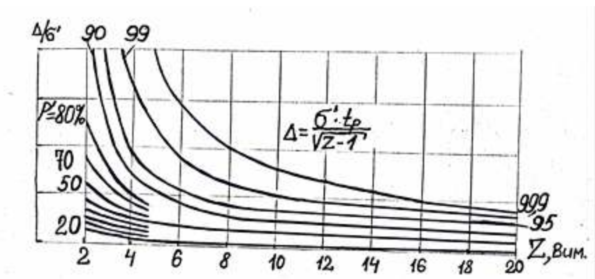

Рисунок 3 – Залежність відносної точності вимірювань $\frac{\Delta}{\sigma'}$ від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

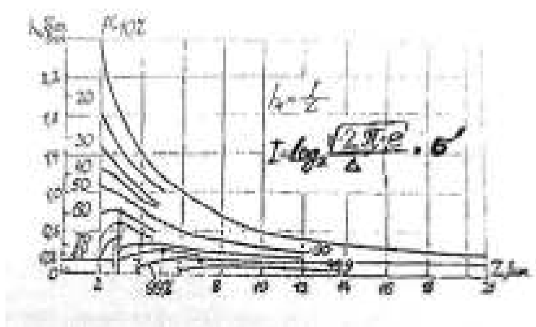

Рисунок 4 – Залежність щільної інформації h_1 від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

Це викликано тим, що ми не диференційовано підійшли до вибору формули для інформації при різних P'. Цей недолік можна усунути, визначивши інформацію за формулою

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

$$I = C(P') + \log_2(\frac{\sqrt{Z-1}}{t_p}). \qquad (22)$$

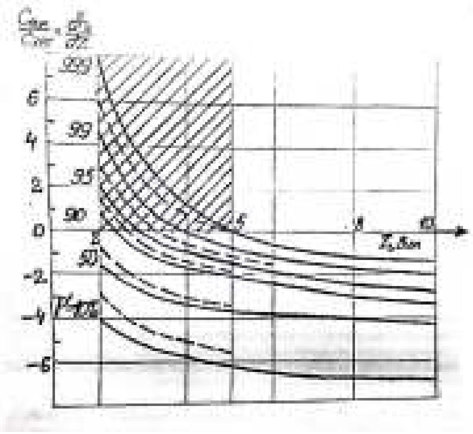

Рисунок 5 – Залежність відношення вартості вимірювань $C_{вим}$ до вартості ЗВТ $C_{ЗВТ}$ від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої вірогідності P'

Перехід від формули (21) до (22) викликаний тим, що при перевірках ми отримуємо інформацію про ЗВТ, і кількість інформації, що отримується при цьому, має бути позитивною. У результаті отримуємо $C(P') = \log_2 t_p$ і відповідну таблицю для уточнених параметрів за різних P' (табл. 2).

Рівняння (20) приймає вигляд:

$$\frac{dh_1}{dZ} = (\frac{c_{вим}}{c_{ЗВТ}}) - \left[\frac{C(P')}{Z^2}\right]. \qquad (23)$$

На рис 5 пунктиром нанесені графіки функцій, що дозволяють більш обґрунтовано визначати. Отримані залежності, представлені на графіках (рис.5 та рис.3), дозволяють, задаючись значеннями $\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}}$, (P') та (Δ),

визначати оптимальну кількість вимірювань $Z_{опт}$ та клас точності ЗВТ (рис. 6), а отже, оцінювати правильність вибору та ефективного використання ЗВТ відповідно до прийнятого інформаційного критерія. Слід зазначити, що розглянутий у цьому розділі «інформаційний підхід» до вирішення завдань вибору та використання ЗВТ може бути використаний в умовах однозначного переходу від традиційних метрологічних показників до інформаційних.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 2

Уточнені параметри за різних P'

P`, %	I*	h_1^*	$\frac{dh_1^*}{dZ}$
10	I-4,71	$h_1 = \frac{4,71}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{4,71}{Z^2}$
50	I-2,05	$h_1 = \frac{2,05}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{2,05}{Z^2}$
90	I+0,6	$h_1 = \frac{0,6}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{0,6}{Z^2}$
95	I+2	$h_1 = \frac{2}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{2}{Z^2}$
99	I+4	$h_1 = \frac{4}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{4}{Z^2}$
99,9	I+8	$h_1 = \frac{8}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{8}{Z^2}$

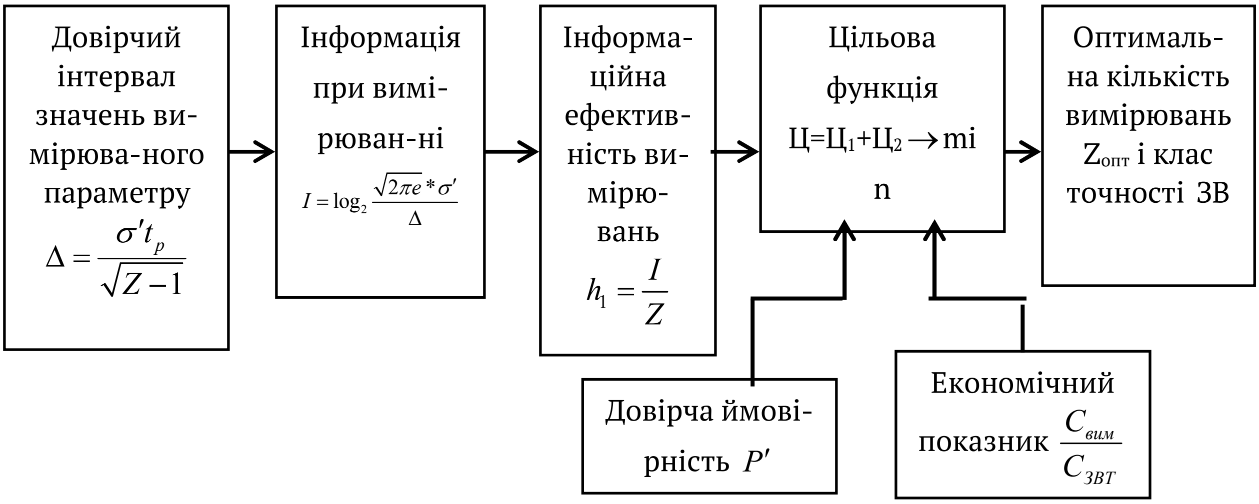

Рисунок 6 – Блок-схема визначення оптимальної кількості вимірювань $Z_{опт}$ та класу точності засобів вимірювання

Висновки

1. Приведено модель правильності вибору та ефективного (за визначеним критерієм) використання ЗВТ.

2. Задавшись відношенням коштовності вимірювань до коштовності самих ЗВТ (Свим/$C_{ЗВТ}$), довірчою ймовірністю (P'), похибкою контролю дослідження Δ, визначається кількість вимірювань параметру об'єкту, який досліджується та клас точності ЗВТ, які використовуються при дослідженні.

3. Запропоновано критерій інформаційної ефективності вимірювань параметрів при дослідженні різних об'єктів ($h_{1=}I/Z$).

4. Запропоновано підхід переходу від традиційних метрологічних показників вимірювань і контролю параметрів об'єктів до інформаційних.

Наукова новизнаю. Запропоновано перехід в оцінці точності вимірювань від традиційних до інформаційних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Садовий М.І. Співвідношення невизначеності у наукових досліджених: историчний аспект/ Наукові записки. Серія : Педагогічні науки. Випуск 168. – Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені Володимира Винниченко, м. Кропивницький. – С. 200-204.
2. International Vocabulary of Basic and General terms I Metrolagy (Міжнародний словник основних і загальних термінів у метрології). 3. Васілевський О.М. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник/ О.М. Васілевський, В.Н. Кучерук, Є.Т. Володарський. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 230 с.
4. ILAC-G17:2002. Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025 (Вступ до концепції невизначеності вимірювань при випробуваннях з урахуванням застосування стандарту ISO/IEC 17025).
5. EA-04/02:1999. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration (Відображення невизначеності вимірювань при калібруванні).
6. EA-04/16:2003. EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing (ЄА настанови щодо відображення невизначеності при кількісних випробуваннях).
7. EURACHEM/CITAC Guide QUAM-P1:2000. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (Розрахунок невизначеності при аналітичних вимірюваннях).
8. Настанова з оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних випробувань. Технічний звіт EUROLAB №1/2006/ Переклад з англ. Та науково-технічне редагування. А.В. Абрамов, А.М.Коцюба, В.М. Новіков. – Київ, Євролаб-Україна, 2008. – 51 с.
9. Поджаренко В.О., Васілевський О.М.,Кучерук В.Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності : навчальний посібник. – Вінниця: ПНТУ, 2008. – 128 с.
10. RACHEM/CITAC Guide, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Second Edition. Laboratory of the Government Chemist, London (2000). ISBN 0-948926-15-5.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

11. EURACHEM/CITAC Guide, Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches. EURACHEM, (2007). Available from http://www.eurachem.org.
12. ISO 21748:2010. Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. ISO, Geneva (2010).
13. Analytical Methods Committee. Measurement uncertainty evaluation for a non-negative measurand: an alternative to limit of detection. Accred. Qual. Assur. Vol 13, pp 29-32 (2008).
14. Імітаційне моделювання систем та процесів/ Електронне навчальне видання. Конспект лекцій/В.Б. Неруш, В.В. Курдеча. – К.:НТУУ «КПІ», 2012. -115 с.
15.Піндус Н.М. Вимірювальний експеримент та обробка результат:. конспект лекцій. -Івано-Франковськ: Факел, 2010. – 248 с.
16. Василенко О.А. Математично- статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навчальний . посібник./ О.А. Василенко, І.А. Сенча. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011. – 166 с.
17. Chris Bissell. Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov: Pioneer of the sampling theorem, cryptography,optimal derection, planetary mapping. IEEE Communications Magazine, 2009. – P. 24-32.
18.Теорема Котельникова [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ni.biz.ua/7/7_12/7_129060_ teorema -kotelnikova.html.- Заголовок з екрану.

REFERENCES

1. Sadovy M.I. Uncertainty ratio in scientific research: historical aspect/ Scientific notes. Series: Pedagogical sciences. Issue 168. - Central Ukrainian State Pedagogical University named after Volodymyr Vynnychenko, Kropyvnytskyi. - pp. 200-204.
2 .International Vocabulary of Basic and General terms I Metrolagy (International dictionary of basic and general terms in metrology).
3. Vasilevsky O.M. Fundamentals of the theory of non-significance of vimiryuvan: assistant / O.M. Vasilevsky, V.N. Kucheruk, E.T. Volodarsky. - Vinnitsa: VNTU, 2015. - 230 p.
4.ILAC-G17:2002. Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025
5. EA-04/02:1999. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
6. EA-04/16:2003. EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing
7. EURACHEM/CITAC Guide QUAM-P1:2000. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements).

8. Guidance on the assessment of uncertainty in the measurement of quantitative test results. Technical report EUROLAB No. 1/2006/ Translation from English. And scientific and technical editing. A.V. Abramov, A.M. Kotsyuba, V.M. Novikov. - Kyiv, Eurolab-Ukraine, 2008. - 51 p.
9. Podzharenko V.O., Vasilevsky O.M., Kucheruk V.Yu. Opratsyuvannya rezul'tativ vimiryuvan on the basis of the concept of non-insignificance : initial help. - Vinnitsa: PNTU, 2008. - 128 p.
10. RACHEM/CITAC Guide, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Second Edition. Laboratory of the Government Chemist, London (2000). ISBN 0-948926-15-5.
11. EURACHEM/CITAC Guide, Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches. EURACHEM, (2007). Available from http://www.eurachem.org.
12. ISO 21748:2010. Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. ISO, Geneva (2010).
13. Analytical Methods Committee. Measurement uncertainty evaluation for a non-negative measurand: an alternative to limit of detection. Accred. Qual. Assur. Vol 13, pp 29-32 (2008).
14. Imitation modeling of systems and processes / Electronic primary knowledge. Lecture notes / V.B. Nerush, V.V. Kurdecha. - K.: NTUU "KPI", 2012. -115 p.
15. Pindus N.M. Vimiryuvalny experiment and a summary of the result:. abstract of lectures. -Ivano-Frankivsk: Fakel, 2010. - 248 p.
16. Vasilenko O.A. Mathematical-statistical methods and analysis in applied studies: the beginning. posibnik./ O.A. Vasilenko, I.A. Sencha. - Odessa: ONAZ im. O.S. Popova, 2011. - 166 p.
17. Chris Bissell. Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov: Pioneer of the sampling theorem, cryptography,optimal derection, planetary mapping. IEEE Communications Magazine, 2009. - P. 24-32.
18. Kotelnikov's theorem [Electronic resource]. – Access mode: http://ni.biz.ua/7/7_12/7_129060_teorema-kotelnikova.html.- Header off screen.
Received 01.03.2023.
Accepted 03.03.2023.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

A model for evaluating the correctness of the choice and efficiency of use according to the specified criterion of means of observation and control of objects of various purposes

The informational approach to solving the problems of observation and control is not used until now. The theory of measurements is based on the concept of entropy of random variables as a measure of their uncertainty (a set of sets of their possible values). The greater the number of values that a discrete random variable can take, or the greater the range of a continuous random variable, the greater their entropy. The amount of information obtained during measurement, control, research corresponds to the reduction of entropy from the value that characterizes the uncertainty that remains after obtaining the result of measurement of some parameters of the objective, phenomena, etc. We are talking about the relationship between accuracy, energy consumption and speed of measuring equipment. The issue of determining the threshold of the maximum possible accuracy of measurements of actual values, as well as obtaining generalizing information-energy ratios, which allow optimizing the procedure for choosing the main quality indicators of measuring equipment (MT) are highlighted. At the same time, making an attempt to more accurately determine the value of a measurement quantity, at some stage we will inevitably encounter the fundamental impossibility of their further clarification, which is ultimately related to the physically possible degree of certainty (in contrast to entropy, which characterizes uncertainty, and which is called non-entropy) of any measurement value, which is determined either by its personal discreteness (for example, when measuring the number of atoms of any substance in a mixture, it is meaningless to talk about the accuracy of the count, which is equal to 0.1 or 0.01 atom) or by its thermal (molecular) fluctuations . This micro-scale uncertainty limit is known as Heisenberg's Uncertainty Rule. The article proposes a model of evaluation and effective use of observation and control of objects of various nature. An "informational approach" to solving the problems of choosing and using measuring equipment in the conditions of the transition from traditional metrological indicators to informational ones is proposed. Let's give an example of the choice of FTA and the number of measurements by this FTA.

Ігнаткін Валерій Устинович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп’ютерно- інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Дудніков Володимир Степанович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Лучишин Тарас Романович - кандидат медичних наук, спеціаліст вищої категорії, заступник директора «Української готельної групи».

Алексєєнко Сергій Вікторович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Юшкевич Олег Павлович- кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Карпова Тетяна Петрівна - старший викладач кафедри матеріалознавства і термічної обробки металів УДУНТ.

Хохлова Тетяна Станіславівна - кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства і термічної обробки металів УДУНТ.

Хомош Юрій Степанович - кандидат економічних наук, доцент, директор Дрогобицького фахового коледжу нафти та газу .

Тіхонов Василь Андрійович - директор Дніпровського фахового коледжу радіоелектроніки.

Valery Ustinovych Ignatkin - doctor of technical sciences, professor, professor of the department of automation and computer-integrated technologies of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Volodymyr Stepanovych Dudnikov - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics of Oles Honchar Dnipro National University.

Taras Romanovych Luchyshyn - candidate of medical sciences, specialist of the highest category, deputy director of the "Ukrainian Hotel Group".

Serhii Viktorovych Alekseenko - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechatronics, Dnipro National University named after Oles Honchar.

Oleh Pavlovich Yushkevich - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics of Dnipro National University named after Oles Honchar.

Tetyana Petrivna Karpova - senior lecturer of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, USUNT.

Tetyana Stanislavivna Khokhlova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals at the Ukrainian National University of Science and Technology.

Yuriy Stepanovych Khomosh - candidate of economic sciences, associate professor, director of the Drohobytsk Oil and Gas Professional College.

Vasyl Andriyovych Tikhonov - director of the Dnipro Vocational College of Radio Electronics.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)