

УДК 621.317

В. Д. Ціделко, Н. А. Яремчук, М. В. Гальовська

РЕПРЕЗЕНТАТИВНА ТЕОРІЯ ВИМІРЮВАНЬ В СУЧАСНІЙ МЕТРОЛОГІЇ

В статті розглянуті основні положення репрезентативної теорії вимірювань з аналізом їх застосування в сучасній метрології. Розглянуто особливості введення ординальної властивості до складу вимірюваних величин.

В статье рассмотрены основные положения репрезентативной теории измерений с анализом их применения в современной метрологии. Рассмотрены особенности введения ординальных свойств в состав измеряемых величин.

The statements of representative theory are considered in the article with analysis of their applications in modern metrology. The features of ordinal properties embedding to the structure of measurands are regarded.

Вступ

В традиційній метрології [1] вимірювані властивості відображаються метрологічними шкалами (різниць і відношень), а вимірювання (як процедура відображення) відповідає кількісному принципу рівноінтервальності відображення. Автори репрезентативної теорії вимірювань [2], [3] розширили поняття вимірювання на властивості, що відображаються номінальними і ординальними шкалами, де принцип рівноінтервальності відображення несправедливий. Але сучасні тенденції розвитку метрології характеризуються її поширенням на властивості, що в традиційній метрології вважають такими, що не підлягають вимірюванню. Зокрема, це стосується властивостей, що відображаються ординальною шкалою [4].

Тобто, за сучасною метрологією, вимірюванню підлягає та частина властивостей, що може бути охарактеризована розміром. Тому виникає необхідність в розгляді основних положень репрезентативної теорії вимірювань з аналізом можливості їх застосування в сучасній метрології.

Постановка задачі

Мета статті – аналіз основних положень репрезентативної теорії вимірювань на предмет їх застосування в сучасній метрології. Це стосується систематизації властивостей і величин, шкал вимірювання, визначення вимірювання, процедури вимірювання, невизначеності вимірювання.

Властивості і величини

Властивості є емпіричною системою з відношеннями (ЕСВ), що формально записується як $\mathbf{Q} = \langle Q; R \rangle$, де $Q = \{q_1, q_2, \dots\}$ – сукупність проявів властивості; $R = \{R_1, R_2, \dots\}$ – сукупність відношень між проявами властивості [5]. Номінальна властивість – це властивість явища, тіла або речовини, що може бути ідентифікована або не ідентифікована по відношенню до властивості, що порівнюється, але не може бути впорядкована у відповідності з розміром [4]. Номінальна властивість подається кортежем $\mathbf{Q} = \{Q; \square\}$, де \square – позначення емпіричного відношення еквівалентності. Номінальна властивість відображається за числовою системою з відношеннями (ЧСВ) $\mathbf{N} = \langle N; = \rangle$, де N – ряд натуральних чисел. Але на практиці існує багато випадків, коли об’єкти реального світу або їх характеристики та атрибути подають не числами, а умовними символами (ССВ – символна система з відношеннями). За ССВ номінальна властивість відображається системою символів $\mathbf{Z} = \{Z; \square\}$. Для номінальної властивості це, наприклад, атлас кольорів, де певний колір позначає певний клас еквівалентності.

Якщо властивість може бути охарактеризована кількісно до опорної, її називають величиною [4]. Атрибути величини – це рід і розмір. Рід – це загальний аспект величин, що можуть взаємно порівнюватись. Наприклад, величини – діаметр, периметр, відстань, довжина хвилі, звичайно розглядають як однорідні, що їх узагальнено називають довжиною. Розмір характеризує кількісний вміст властивості. Розмір – це атрибут, що відсутній у номінальній властивості. Тому властивості можна розділити на номінальні властивості та величини за наявністю або відсутністю розміру (рис. 1).

Ординальна величина [4] – це величина, яку визначають за встановленою процедурою вимірювання, для якої характерне відношення порядку за розміром серед однорідних величин, але не визначені алгебраїчні операції. Приклади ординальних величин: твердість за Роквеллом С, октанове число бензину, сила землетрусу за шкалою Ріхтера. Формально, як ЕСВ, ординальну величину подають кортежем $\mathbf{Q} = \langle Q; \square; \succ \rangle$, де \succ – позначення емпіричного відношення порядку. Ординальну величину визначають за ЧСВ $\mathbf{N} = \langle N; =; \succ; + \rangle$.

Вимірювання

В репрезентативній теорії [3] встановлено наступне неформальне визначення вимірювання: це емпіричний, об’єктивний процес передавання чисел властивостям об’єктів чи явищ реального світу, щоб таким чином описати їх.

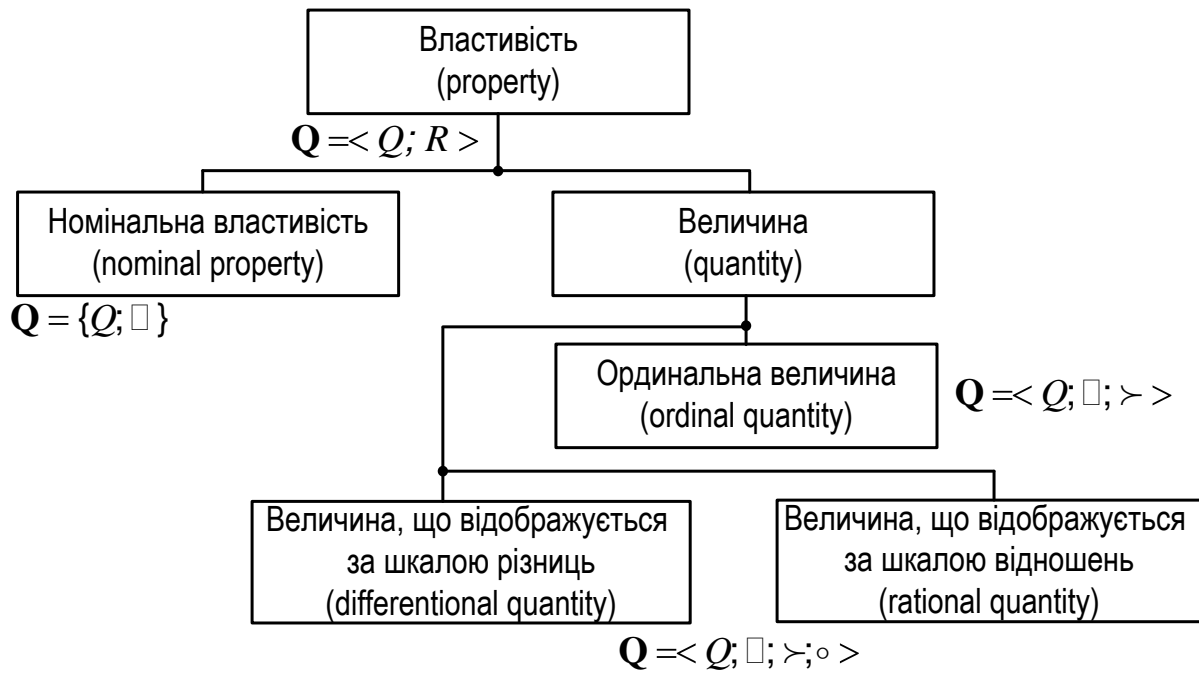


Рис. 1. Систематизація властивостей як емпіричних систем з відношеннями

За [4] – це процес експериментального отримання одного чи кількох значень величини, що можуть бути їй обґрунтовано приписані. Відмінність визначень полягає в наступному: вимірювання в сучасній метрології розповсюджується тільки на величини, в той час як в репрезентативній теорії розглядається можливість вимірювання за номінальною шкалою.

Аналіз особливостей вимірювання в репрезентативній теорії дозволяє виділити спільні з метрологією, зокрема:

- Вимірювання – це передавання чисел властивостям об’єктів чи явищ. Тобто це опис властивостей. Таким чином, при вимірюванні емпірична (матеріальна) система відображається числовою або символічною (формальною) системою.
- При вимірюванні числа передають прояви властивостей. Тоді відношення між числами обумовлюється емпіричними відношеннями між проявами властивостей.
- Якщо числа, передані проявам властивості двох об’єктів вимірювання, дорівнюють одне одному, вважають, що прояви двох властивостей емпірично не розрізняються. Емпірична нерозрізнимість відповідає рівності чисел.
- Вимірювання можливе за існуванням чіткої концепції властивості як абстрактного аспекту цілого класу об’єктів, в яких індивідуальні прояви властивості є предметом вимірювань.

- Вимірювання – об’єктивний процес. Це означає, що числа, які передаються властивості вимірюванням, повинні бути в межах невизначеності результату вимірювання, незалежними від спостерігача.
- Вимірювання є емпіричною процедурою. Концепція вимірюваної властивості повинна бути заснована на емпіричному відношенні.

Але є особливості репрезентативної теорії вимірювань, що не відповідають положенням класичної метрології. Зокрема, це стосується кількісного принципу рівноінтервальності відображення, що заснований на використанні одиниці вимірювання. Один із авторів репрезентативної теорії вимірювання [3] зауважує, що при вимірюванні має місце порівняння проявів властивості з іншими проявами тієї ж властивості. Це спільна частина багатьох неформальних визначень вимірювання. Але багато визначень йде ще далі і встановлюють, що міра властивості визначається відношенням розміру властивості до еталонного розміру, який береться за одиницю, тобто значення величини x дорівнює

$$x = E \left| \frac{X}{q_x} \right| q_x, \quad (1)$$

де X – розмір величини, q_x – розмір одиниці вимірювання, q_x – розмірність величини, $E|\cdot|$ – ціла частина відношення розмірів.

Це твердження (за репрезентативною теорією) несправедливе для багатьох шкал вимірювання і обмежує можливості вимірювання. Виникає питання, чи можна кожне передавання чисел властивостям класифікувати як вимірювання. Одна крайня точка зору (в соціальних і психологічних науках) така, що кожне емпіричне об’єктивне надання чисел проявам властивостей можна називати вимірюванням. Друга крайня точка зору, що тільки числа, які відображають тим чи іншим чином відношення до розміру одиниці властивості, є мірами. Це класична точка зору і багатьох визначень вимірювання в традиційній метрології і фізиці. Багато інших визначень припускають: для того, щоб бути вимірюванням, передавання чисел повинно передбачати щонайменше емпіричний порядок серед проявів властивостей у відповідності з розміром. Останнє визначення вимірювання прийнято в сучасній метрології, де до переліку вимірюваних величин увійшли ординальні величини.

Формально вимірювання в репрезентативній теорії визначається як об’єктивна емпірична операція

$$M: Q \rightarrow N, \quad (2)$$

така, що $\mathbf{Q} = \langle Q; R \rangle$ наноситься гомоморфно на $\mathbf{N} = \langle N; R \rangle$ за допомогою M і F , де F – перенесення одне до одного з областю R і межами P :

$$F: R \rightarrow P, \quad (3)$$

так, що $P_i = F(R_i)$; $P_i \in P$; $R_i \in R$.

Під гомоморфним перенесенням розуміють співвідношення

$$R_i(q_1, q_2, \dots, q_n) \leftrightarrow P_i(M(q_1), M(q_2), \dots, M(q_n)),$$

яке виконується $\forall R_i \in R, \forall P_i \in P$ та $P_i = F(R_i)$.

Таким чином, репрезентативна умова вимірювання вимагає, щоб вимірювання було встановлене у відповідності між проявами властивості і числами таким чином, щоб відношення між розглянутими проявами властивості припускали відношення між їх зображеннями у ряді чисел.

Шкала вимірювання (шкала величини)

В репрезентативній теорії шкалу вимірювання визначають кортежем $\langle Q; N; M; F \rangle$. Згідно [4] шкалу вимірювання або шкалу величини визначають як впорядкований ряд значень величин певного роду, що використовується для розміщення однорідних величин відповідно до їх розміру.

Шкала ординальної величини або ординальна шкала – це шкала величини, що визначається формальним узгодженням, за якою відбувається тільки порівняння розміру. В ординальних шкалах (шкалах порядку) ЕСВ $Q = \langle Q; \square; \succ \rangle$ встановлюється на Q . Ряд еталонних об'єктів, що відрізняються за розміром $S_i \in Q$ розміщують впорядковано $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ у відповідності до $\langle Q; \square; \succ \rangle$. Елемент $q \in Q$ можна порівняти з елементами S , як і в номінальній шкалі. Якщо $q \square S_i \in S$, йому приписують номер S_i . Якщо q не є еквівалентним жодному $S_i \in S$, то можна визначити два еталонних елементи, між якими він знаходиться.

Екстенсивні шкали фізичного вимірювання засновані на встановленні на впорядкованій ЕСВ операції \circ комбінування об'єктів, яка має формальні властивості додавання. Нехай об'єкти $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4 \in \Omega$ мають прояви властивостей $q_1, q_2, q_3, q_4 \in Q$. Для екстенсивної шкали повинна бути встановлена операція комбінування ω_1, ω_2 по відношенню до q_1, q_2 , яку позначають як $q_1 \circ q_2$ з наступними властивостями:

- $q_1 \circ q_2 \in Q$;
- $q_1 \circ q_2 > q_1$;
- $q_1 \circ q_2 \square q_2 \circ q_1$ (комутативність);
- $q_1 \circ (q_2 \circ q_3) \square (q_1 \circ q_2) \circ q_3$ (асоціативність);
- якщо $q_2 \square q_3$, тоді $q_1 \circ q_2 \square q_1 \circ q_3$;
- якщо $q_3 \succ q_2$, тоді $q_1 \circ q_3 \succ q_1 \circ q_2$;
- якщо q_1, q_2, q_3, \dots мають один до одного відношення еквівалентності і є елемент $q'_1 \succ q_1$, тоді існує множина n елементів q_i таких, що

$q'_1 \prec q_1 \circ q_2 \circ \dots \circ q_n$ (постулат Архімеда).

З цими визначеннями $\langle Q; \square; \succ; \circ \rangle$ має структуру з тими самими властивостями, як і ЧСВ $\langle Re; =; \succ; + \rangle$. Шкалу встановлюють з емпіричною операцією порядку і з «адитивним» комбінуванням. Вибирають об'єкт $S_1 \in Q$, як еталон і йому приписують число 1. Далі вибирають такий інший об'єкт $S'_1 \in Q$, що $S'_1 \square S_1$. Можна сконструювати чи вибрати еталон $S_2 \square S_1 \circ S'_1$ і приписати йому число 2, $S_3 \square S_2 \circ S_1$ і приписати йому число 3 і т.д. Можуть бути отримані часткові еталони $S_{1/2}, S'_{1/2} \in Q$, для яких $S'_{1/2} \circ S_{1/2} \square S_1$. Тоді $S_{1/2}$ приписують число $1/2$.

Можна отримати еталонний ряд: $S = \{\dots, S_{1/2}, S_1, S_2, S_3, \dots\}$. Елемент $q \in Q$ може бути вимірний знаходженням елемента S_i , до якого приводить відношення еквівалентності, і йому приписують число, що відповідає S_i .

Допустимі перетворення для шкали

Умова репрезентативності ((2),(3)) може бути справедливою для більш, ніж одного перенесення M . Можна допустити певну трансформацію однієї шкали в іншу без знецінення умови репрезентативності. Тому постає задача визначення класу перетворень шкали, для якого справедлива умова репрезентативності.

Існує цілий ряд шкал, які гомоморфно відображають певну ЕСВ Q в певну ЧСВ N . Цей клас шкал позначають $M(Q, N)$. Шкали, що належать класу $M(Q, N)$, називають еквівалентними, а сам клас $M(Q, N)$ – класом еквівалентних шкал. Дві шкали еквівалентні тоді і тільки тоді, коли існує частковий ендоморфізм певної ЧСВ, яка відображає одну шкалу в іншу [2]. Елементи множини часткових ендоморфізмів називають допустимими перетвореннями шкали, тому що вони переводять певну шкалу в еквівалентні шкали.

Розглянемо, як приклад, перенесення, яке відображає гомоморфно ЕСВ $\langle Q; \square; \succ; \circ \rangle$ на ЧСВ $\langle Re; =; \succ; + \rangle$, що є фундаментальною вимірювальною процедурою зі шкалою, заснованою на адитивних комбінаціях. Якщо всі міри $M(\cdot)$ замінити на $\alpha M(\cdot)$, де α – дійсне додатне число, тоді міра $\alpha M(\cdot)$ зберігає потрібний гомоморфізм і помноження на дійсне додатне число – допустиме перетворення. Це той же ефект, що і зміна одиниці на $1/\alpha$ від первісної шкали.

Можна класифікувати шкали за класами перетворень, допустимими для них. В табл. 1 M – числа, а M' - числа на перетвореній шкалі.

Таблиця 1.

Характеристики шкал вимірювання

Тип шкали	Клас допустимих перетворень	Статистичні міри	
		Розміщення центру	Розсіювання
номінальна (найменування)	$M' = F(M)$, де F - будь-яке заміщення одне одного	мода	інформація

ординальна (порядку)	$M' = F(M)$, де F - будь-яка моно- тонно зростаюча функція	медіана	сприйнятливість
інтервальна (різниць, від- ношень, пропо- рційна)	$M' = \begin{cases} \alpha M + \beta; \alpha > 0 \\ \alpha M; \alpha > 0 \end{cases}$	середнє арифметичне	середнє квадратичне ві- дхилення, дисперсія

Шкали можна також класифікувати за статистичними мірами, що використовуються при вимірюваннях за різними типами шкал.

Формування концепції властивості

Формування концепції властивості передуює розвитку процедури вимірювання і формуванню шкали. Твердість, наприклад, повинна спочатку бути ясно визначеною, як опір речовини до деформації до того, як знайдено шкалу для її вимірювання. Концепція властивості формується як об'єктивне правило для класифікації аспектів об'єктів, що емпірично спостерігається, в єдиний ряд разом з сім'єю об'єктивних емпіричних відношень. Формально концепція властивості визначається як ряд Q всіх проявів q , тобто $Q = \{q\}$, разом з рядом всіх відношень R на $\{q\}$.

Finkelstein в роботі [4] писав: «Неможливо виміряти таку властивість, як краса. Корисність концепції очевидна. Але немає об'єктивного правила для класифікації проявів краси. Подібно, немає об'єктивних емпіричних відношень таких, наприклад, старшинство у відношенні проявів краси».

Коли існує ясно визначене поняття властивості як ряду її проявів, які можуть бути об'єктивно і емпірично класифіковані разом з рядом емпіричних відношень, тоді завжди можна знайти ряд символічних відношень, за яким ця властивість може бути презентована.

Проблема формування концепції властивості завжди актуальна, тому що номенклатура вимірюваних величин постійно розширюється. За теперішнього часу вона гостро проявляється в аналітичних вимірюваннях, де потрібно вимірювати «масличність», «сахаристість», «кислотність», «крохмальність» і т.п.

Звичайно розробляють концепцію властивості, потім шкалу вимірювання (рис. 2). Накопичення даних при вимірюванні веде до уточнення або переоцінки концепції властивості. Це, в свою чергу, веде до удосконалення шкали вимірювання. Процес іде за спіраллю. Прикладом є історія розвитку термометрії.

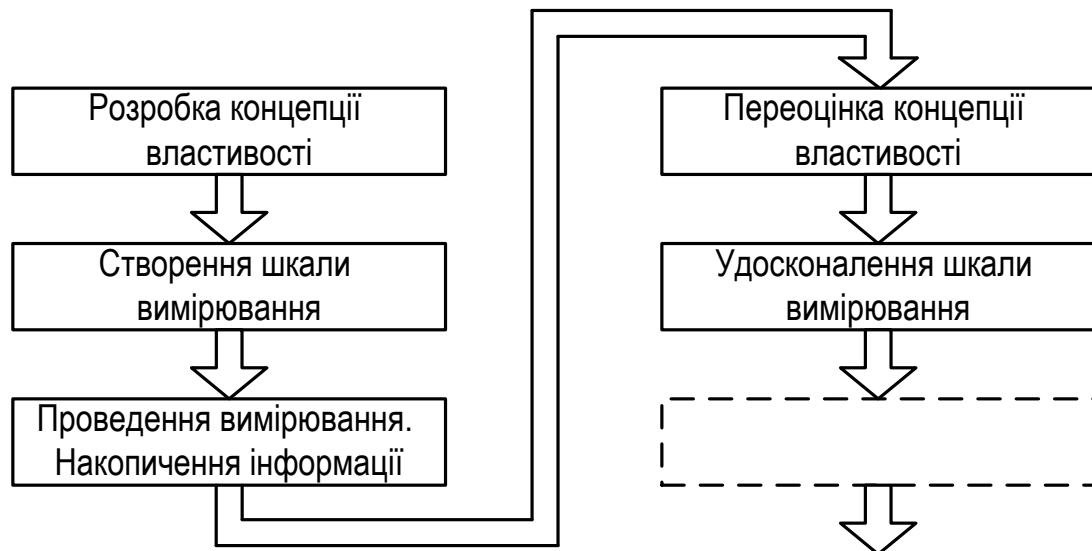


Рис. 2. Ілюстрація розвитку концепції властивості і шкали вимірювання

Однією з головних проблем розвитку є забезпечення того, щоб шкала вимірювання, встановлена як множина «мір» властивості, відповідала головній концепції властивості.

Складові невизначеності вимірювання

Недосконалість визначення величини, або, інакше, недосконалість концепції властивості, є причиною виникнення складової невизначеності, що подано в [4] як «definitional uncertainty», тобто невизначеність поняття «величина». Невизначеність поняття «величина» [4] – це складова невизначеності вимірювання, що є результатом обмеженості деталей у визначенні вимірюваної величини. Будь-які зміни в деталях, що описують вимірювану величину i , відповідно, змінюють рівняння вимірювання, дають нову вимірювану величину i , відповідно, нову її невизначеність.

Невизначеність вимірювання характеризує розсіювання ряду або значень вимірюваної величини. При цьому вважають, що систематичні впливи усунено їх відповідною корекцією, а обчисленню підлягає складова невизначеності, зумовлена недосконалістю корекції систематичних ефектів. Якщо систематичні ефекти не коректуються, вони повністю враховуються невизначеністю.

Таким чином, при складанні бюджету невизначеності розглядають такі її складові: складову невизначеності, зумовлену випадковими ефектами при вимірюванні; невизначеність поняття «величина»; інструментальну невизначеність [5]. Інструментальна невизначеність за [4] – це складова невизначеності вимірювання, що належить засобу вимірювання і визначається його калібруванням. В [6] наведені загальні рекомендації з подання результатів вимірювання і невизначеності в неметричних шкалах (ординальних і номінальних). В ординальних шкалах за результат вимірювання приймають

значення, що відповідає медіані ряду вимірювань, а границі невизначеності вимірювань подають як розмах результатів вимірювань.

Неможливість встановлення для неархімедових величин рівноінтервальності відображення за шкалою обумовлює непридатність до таких величин алгебраїчних операцій, диференціювання і інтегрування, а, таким чином, і поняття щільності ймовірності.

В дискретних ординальних шкалах невизначеність вимірювання може визначатися сукупністю декількох послідовних класів еквівалентності.

В номінальних шкалах, у загальному випадку, неможливо вводити кількісні параметри типу розмаху і стандартної невизначеності, а має сенс оперувати «невизначеністю ідентифікації», тобто можливістю віднесення результату вимірювання до одного чи декількох класів еквівалентності. В номінальних шкалах, впорядкованих за проявами якісної властивості, можливо введення специфічних параметрів шкали і розмаху без відношення пропорційності для характеристики невизначеності результатів вимірювань.

Висновки

Розглянуто основні положення репрезентативної теорії вимірювань з аналізом їх застосування в сучасній метрології. За репрезентативною теорією вимірювань, яка пов'язана з теорією шкал, вимірюванню підлягають номінальні, ординальні і екстенсивні властивості. За традиційною метрологією вимірювані величини відображаються тільки метричними шкалами, для яких справедливий кількісний принцип рівноінтервальності відображення. В сучасній метрології (у порівнянні з традиційною) вимірюваною величиною вважають ту, що може бути порівняна за розміром, тобто до вимірюваних величин віднесено ординальну величину, для якої принцип рівноінтервальності відображення при вимірюваннях несправедливий.

При вимірюванні виконуються умови репрезентативності, за якою прояви властивостей відображаються числами з перенесення емпіричних відношень на відношення між числами.

Умова репрезентативності може бути справедливою для декількох шкал, пов'язаних допустимими перетвореннями. Допустимим перетворенням відповідають статистичні міри розміщення центру і розсіювання значень вимірюваних величин. Так, для ординальних величин несправедливі параметричні статистичні характеристики, що побудовані з використанням арифметичних операцій, недопустимих для ординальної шкали.

Формування концепції властивості є обов'язковим і для репрезентативної теорії, і для традиційної метрології. Недоліки формування концепції властивості є однією з причин невизначеності вимірювання.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с.
2. Пфанцагль Н. Теория измерений, перевод с англ. – М:Мир, 1976. – 248 с.

3. *Finkelstein L.* Theory and Philosophy of Measurement // HandBook of measurement Science. Vol. 1. Edited By P.H. Sydenham, 1982.
4. ISO/IEC Guide 99:2007 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM) – ISO.- 2007.
5. *Ціделко В.Д., Яремчук Н.А., Василенко М.В.* Систематизація понять метрології, сучасні тенденції // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2007. - №4.
6. *Дойников А.С.* Неопределенность измерений по шкалам различных типов // Системы обработки информации. – 2007. – выпуск 6 (64).

УДК 621.317

Ю. С. Шумков

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИПРОБУВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ, ОТРИМАНИХ НА ОСНОВІ ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНИХ СПЛАЙ- НОВИХ МОДЕЛЕЙ

Дано обґрунтування щодо застосування при дослідженнях лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами класу “експоненціальних” випробувальних сигналів (ВС) із метою отримання уніфікованого відгуку заздалегідь заданої форми, зручної до аналізу та контролю, незалежно від структурної (чи фізичної) моделі кіл. Проведено дослідження і отримані оцінки похибки вимірювання параметрів електричних кіл і їх компонентів при використанні ВС, що сформовані на основі експоненціальних сплайнових моделей. Розроблено прийоми і рекомендації з мінімізації зазначеної похибки на етапі побудови сплайнової моделі ВС.

Дано обоснования применения при исследованиях линейных электрических цепей с сосредоточенными параметрами класса “экспоненциальных” испытательных сигналов (ИС) с целью получения унифицированного отклика заранее заданной формы, удобной для анализа и контроля, независимо от структурной (или физической) модели цепи. Проведено исследования и получены оценки погрешности измерения параметров электрических цепей и их компонентов при использовании ИС, что сформированы на основе экспоненциальных сплайновых моделей. Разработаны приемы и рекомендации по минимизации указанной погрешности на этапе построения сплайновой модели ИС.

The grounds of application are given at researches of linear electric circuits with the concentrated parameters of class of “exponential” testers signals (TS) with the purpose of receipt of compatible response of the beforehand set form comfortable for the analysis and control regardless of model of circuits. Researches are conducted and estimations of error of measuring of parameters of circuits and their components are got at the use TS, that formed on the basis of