УДК.621.317

Г. Микитин

ЗМІСТ І ПРИЗНАЧЕННЯ МІРИ ТА ШКАЛИ МІРЯЛЬНОГО ПРИЛАДУ

Викладені результати аналітичного огляду інтерпретації поняття шкали міряльного приладу, визначено фізичний зміст метричної шкали, запропоновано визначення шкали.

Умовні позначення:

S_0 - середнє квадратичне відхилення результату міряння;

Θ_0 -невиключена систематична похибка;

x, x_1 - інформативні параметри вхідного сигналу міряльного засобу;

y, y_1 - інформативні параметри вихідного сигналу міряльного засобу;

$x0$ - значення міри;

$\widetilde{x}_1$ - оцінка;

$y=\varphi(x)$ - функція перетворення;

$y=\widehat{\varphi}(\widetilde{x})$ - градуювальна характеристика;

Δx - помилка перетворення;

S - шкала міряльного засобу;

$X(S)$ - у відповідній шкалі точковий потік;

$\delta(\cdot)$ - дельта функція.

Обов'язковими елементами процесу міряння є: фізична величина, значення якої необхідно виміряти, математична модель фізичної величини, метод міряння, прилад, людина, що виконує міряння, або мікропроцесор, при умові автоматизації мірянь, результат міряння, умови міряння. Отримання результату міряння з допустимою похибкою обумовлює необхідність забезпечення єдиності мірянь.

Для досягнення єдиності і точності мірянь необхідне виконання наступних умов: результати мірянь повинні виражатись в одиницях фізичних величин; засоби мірянь повинні підлягати періодичній метрологічній перевірці; метрологічні характеристики міряльних засобів повинні підлягати нормуванню; результати мірянь повинні подаватись за певною формою; міряння повинні виконуватись за атестованими методиками. Державна система забезпечення єдиності мірянь встановлює вимоги до еталонів одиниць фізичних величин, до системи передачі розміру одиниці кожної величини, до робочих засобів. Передачу розмірів одиниці фізичної величини

здійснюють схеми метрологічної перевірки, основу яких складають методи і міри.

Залежно від степеня точності і ділянки застосування, міри поділяються на: еталони, зразкові та робочі. Зокрема, зразкові міри використовуються не тільки для метрологічної перевірки робочих мір приладу, а й для їх градуювання. Градуювання приладів дозволяє отримати безпосередньо результати мірянь за різних умов, обумовлених методами і засобами міряння. Процес градуювання дозволяє здійснити перехід від показів приладу до результату міряння, тим самим відображає побудову шкали приладу.

1. Питання вибору міри в історичному ракурсі

Міра і шкала є основними елементами в розумінні забезпечення єдиності і точності міряння. Розглянемо кожний зокрема та у взаємозв'язку. Спочатку про міри. У загальному розумінні термін "міра" означає засіб оцінки. У метрології цей термін має два значення [1]. Перший - означає одиницю (наприклад, у виразі "квадратні міри"). Другий - конкретне відтворення одиниці (наприклад, літрова міра). Інколи термін "міра" вживається у розумінні: числове значення величини. Таким змістом оперують в геометрії.

1.1. Системи одиниць фізичних величин

Перші спроби створення системи одиниць відносяться до часів розквіту вавілонської культури (XXV століття до нашої ери). Наукове обгрунтування системи одиниць починається лише з XVIII століття, коли розвиток науки, виробництва і техніки викликає потребу в еталонах. Восьмого травня 1790 року Національними зборами Франції була прийнята метрична система мір, яка об'єднувала в себе одиниці довжини, площі, об'єму, місткості, маси, основними з яких були дві одиниці: метр і кілограм. Одиниця довжини - метр, становила одну десятимільйонну частку чверті паризького меридіану. "Архівний метр" було відтворено платиновою лінійкою перерізом 25×4 мм. Відстань між добре відполірованими кінцями лінійки становила один метр з точністю до 20 мкм.

З часом було встановлено, що "архівний метр" потребує уточнення своїх розмірів. Двадцять шостого вересня 1889 року I Генеральна конференція по мірах та вагах прийняла новий еталон метра. Цей еталон виконаний як платино-іридієвий стержень з нанесеними на внутрішню полірована поверхню штрихами. Відстань між штрихами відтворювала "архівний метр". Усього було виготовлено 30 прототипів еталону метра. Один з них став міжнародним і використовувався у науці, техніці понад 70 років.

Роботи по вдосконаленню еталона метра проводились в оптиці [2]. Під еталоном в оптиці розуміють нормаль. Термін "нормаль" застосовували до переходу між енергетичними рівнями, довжина хвилі або енергія якого використовувалась надалі для порівняння. Енергетичні нормалі першого, другого та інших порядків утворювали систему, в якій одна нормаль була основною, а решта порівнювались з нею. Довжина хвилі λ і частота ν, які є ознаками різного роду електромагнітного випромінювання, мають безпосередній зв'язок з основними фізичними величинами в метрології - довжиною і часом. Через основні нормалі визначені основні одиниці для міряння довжини та часу. Метр визначається через довжину хвилі одного з переходів в криптоні-86 (^{86}Кг). Секунда визначається через частоту одного з переходів в цезії-133 (^{133}Cs). Вимогам до нормалі першого порядку задовільнила оранжева спектральна лінія ^{86}Кг з довжиною хвилі у вакуумі λ=6057,80211 Å. В 1960 році одинадцята Генеральна конференція по мірах і вагах прийняла наступне означення одиниці довжини: метр є довжина, рівна 1650763,73 довжин хвиль випромінювання у вакуумі, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптону-86. Новий еталон було створено з точністю до $4 \cdot 10^{-9}$ м.

Метрична система мір була першою системою одиниць фізичних величин. Систему одиниць, як сукупність основних і похідних одиниць, вперше запропонував Гаус. Основними одиницями цієї системи були прийняті наступні одиниці: довжини -

міліметр, маси - кілограм, часу - секунда. Всі решта одиниці визначались за допомогою цих трьох одиниць. Таку систему Гаус назвав абсолютною. З розвитком фізики і техніки виникли інші системи одиниць фізичних величин, які грунтуються на метричній основі і побудовані за принципом, запропонованим Гаусом [3]. Були встановлені три основні міжнародні електричні одиниці: ом, ампер, вольт. Решта міжнародних електричних одиниць були визначені як похідні від них.

У 1960 році на одинадцятій конференції по мірах і вагах було затверджено і рекомендовано до використання Міжнародну систему одиниць (СІ). До її складу ввійшли 6 основних одиниць. У 1971 році СІ доповнено сьомою одиницею - одиницею речовини - моль. Отже, СІ має 7 основних одиниць фізичних величин: метр (одиниця довжини), кілограм (одиниця маси), секунда (одиниця часу), ампер (одиниця сили електричного струму), кельвін (одиниця термодинамічної температури), кандела (одиниця сили світла), моль (одиниця кількості речовини); дві додаткові одиниці: радіан (одиниця площинного кута), стерадіан (одиниця тілесного кута) і більше ста похідних одиниць. Похідні одиниці СІ утворюються з основних і додаткових одиниць [3].

Із шести основних одиниць фізичних величин розглянемо одиницю електричного струму - ампер. За одиницю сили електричного струму вибрано ампер. Первинний еталон ампера [4] складається з струмових ваг і міри електричного опору. Значення сили постійного електричного струму, яке відтворюється еталоном і приймається незмінним в часі, дорівнює 1,018646 А. Первинний еталон забезпечує відтворення одиниці з середнім квадратичним відхиленням результату міряння S_0, що не перевищує $4 \cdot 10^{-6}$, при невиключеній систематичній похибці - Θ_0, що не перевищує $8 \cdot 10^{-6}$. Останнім часом відкриваються значні перспективи в напрямку підвищення точності відтворення одиниць електричного струму за рахунок використання атомних констант (гіромагнітного відношення протону), тунельного ефекту в надпровідниках (ефект Джозефсона) та інших досягнень сучасної фізики.

Використовуються спеціальні еталони одиниці сили змінного струму низької та високої частоти. Спеціальний еталон одиниці сили змінного струму низької частоти відтворює та зберігає одиницю сили струму в межах від 0,01 до 10 А в частотному діапазоні від 40 до $1 \cdot 10^5$ Гц [5]. Діапазон значень сили струму, відтворюваних високочастотним спеціальним еталоном, знаходиться в межах від 3 до 100 А [6]. Спеціальний еталон одиниці струму низької частоти покладений в основу мірянь значень сили струму та метрологічної перевірки приладів в діапазоні від $2 \cdot 10^{-5}$ до 25 А з межами частотного діапазону від 40 до $1 \cdot 10^5$ Гц, а спеціальний еталон одиниці сили струму високої частоти покладений в основу мірянь значень сили струму та метрологічної перевірки приладів в діапазоні від 0,04 до 300 А з межами частотного діапазону від 0,1 до 300 мГц [5,6].

Якщо еталон сили електричного струму є еталоном основної одиниці електричної величини, то еталони напруги, електричного опору, індуктивності, ємності відносять до еталонів похідних одиниць електричних величин. Залежно від точності відтворення одиниці і призначення, еталони поділяються на первинні, які забезпечують відтворення одиниці з найвищою точністю, і вторинні, значення яких встановлюється за первинним еталоном. Вторинні еталони є робочими і призначені для метрологічної перевірки зразкових засобів міряння.

1.2. Міри електричних величин

Міри електричних величин за призначенням поділяються на зразкові і робочі. Зразкові використовуються безпосередньо для точних мірянь. Залежно від точності відтворюваної фізичної величини, зразкові міри бувають 1, 2, і 3-го розрядів, причому найменша похибка відтворення у міри 1-го розряду. Робочі міри виготовляють з широким діапазоном номінальних значень електричних величин і використовують для метрологічної перевірки приладів. За відтворюваними значеннями міри поділяються на однозначні, багатозначні набори мір.

Розглянемо міри і еталони напруги. Як міри напруги (зразкові і робочі)

використовуються нормальні елементи (гальванічні елементи, напруги яких точно відомі). Розрізняють нормальні елементи з насиченим і ненасиченим розчином сірчанокислого кадмію. В елементах з насиченим розчином значення напруги значно стабільніше, ніж в елементів з ненасиченим розчином. Як міри електричної напруги часто використовують стабілізовані джерела напруги.

Первинний еталон вольта [7] складається з комплексу наступних засобів вимірювань: міри напруги на основі ефекту Джозефсона; групи насичених нормальних елементів; компаратора для порівняння нормальних елементів з мірою напруги на основі ефекту Джозефсона; компаратора для порівняння нормальних елементів. Номінальне значення електрорушійної сили (е.р.с.), що відтворюється еталоном, дорівнює 1 В. Первинний еталон забезпечує відтворення одиниці з середнім квадратичним відхиленням результату міряння S_0 що не перевищує $5 \cdot 10^{-8}$. Невиключена систематична похибка Θ_0 не перевищує $1 \cdot 10^{-6}$.

Використовується спеціальний еталон одиниці змінної напруги, який відтворює та зберігає одиницю змінної напруги в межах від 0,1 до 10 В у частотному діапазоні від 20 до $3 \cdot 10^7$ Гц і покладений в основу мірянь значень змінної напруги та метрологічної перевірки приладів в межах від 0,001 до 1000 В [8].

Стосовно первинних еталонів одиниць електричного опору, індуктивності, ємності, вони складаються з відповідних комплексів міряльних засобів і відтворюють одиниці електричного опору, індуктивності, ємності з відповідною точністю.

2. Поняття шкали приладу та її тлумачення

Міри фізичних величин є основою міряльного процесу. В залежності від способу застосування міри величини, відомі методи мірянь: метод безпосередньої оцінки та методи порівняння з мірою. При методі безпосередньої оцінки значення міряної величини визначають безпосередньо за відліковим пристроєм приладу, шкала якого заздалегідь проградуйована мірою, яка багатократно відтворює значення міряної величини.

Група методів порівняння з мірою дозволяє здійснювати порівняння значення міряної величини із значенням, відтворюваним мірою. Тут міра відомої величини, яка однорідна з міряною, бере безпосередню участь в процесі міряння. Прикладом застосування методів порівняння з мірою є міряння значень електричного опору, напруги, частоти аналогивими та цифровими засобами. У випадку відсутності мір, приладів, умов реалізації мірянь значень фізичних величин процес міряння зводиться до перетворення і приведення їх до фізичних величин, які можливо співставити з мірою (довжина, кут, часові інтервали, вага, електричний струм), а заодно побудувати шкалу приладу.

Дещо про шкали. Як і всі інші основні метрологічні поняття, шкалу неодноразово означували:

- шкала є сукупністю відміток, розташованих вздовж будь-якої ліпії, які зображають ряд послідовних чисел, відповідних до значень вимірюваної величини [1];
- шкала засобу вимірювання, як частина його відлікового пристрою, це сукупність відміток і чисел відліку, або інших символів, що відповідають рядові послідовних значень величин, в одиницях якої дістають покази засобу вимірювання [9];
- шкала засобу вимірювання - впорядкована сукупність поділок разом із пов'язаною з нею нумерацією, частина показуючого пристрою [10].

У наведених означеннях не надається значення мірі, яка відображає процес побудови шкали. З метою уточнення змісту і призначення шкали розглянемо її різновидність і побудову.

3. Шкали

Відповідно до видів фізичних величин розрізняють неметричні та метричні шкали [11]. До неметричних шкал відносять: номінальну та ординальну шкали. Ознакою номінальної шкали є числа, умовні назви об'єктів або їх класів. Номінальну

шкалу ще називають шкалою найменувань. Ординальна шкала або шкала порядку враховує наявність відношення порядку в системі об'єктів.

До метричних шкал відносять: інтервальну шкалу, шкалу відношень та абсолютну. Інтервальну шкалу використовують у випадку, якщо в системі об'єктів, впорядкованих за певною ознакою, існує чотиричленне відношення еквівалентності інтервалів. Тобто, можна вказати чотири об'єкти, перший з яких відстає від другого на стільки ж, наскільки третій від четвертого. Прикладом інтервальної шкали є температурна шкала. Розглянемо шкалу відношень або пропорційну шкалу. В системі об'єктів, що припускають використання цієї шкали, повинно бути визначено відношення пропорційності між чотирма об'єктами, або відношення рівності відношень двох пар об'єктів. Шкалою відношень описуються електричні напруги.

Шкала, яка не допускає перетворень подібності, де числа приписуються об'єктам однозначно, називається абсолютною. У теорії мірянь шкали відомі ще як концептуальні і матеріальні [12]. Концептуальна шкала характеризується визначеним впорядкуванням числових значень, так званою ціною поділки шкали або шкальним значенням, яке теоретично можна присвоювати міряним величинам. Матеріальна шкала визначається впорядкованою величиною знаків на міряльному пристрої в більшості випадків множиною цифр, зчитування яких дозволяє нам присвоювати числові значення мірам міряних величин.

Для міряльних процесів характерні метричні шкали. Вони можуть бути градуйованими або умовними; нульовими або безнульовими. Нульові можуть бути односторонніми і двосторонніми. В залежності від розміщення нуля між кінцевими відмітками, двосторонні шкали бувають симетричними і несиметричними. Важливою ознакою шкали приладу є її характер, тобто, функціональна залежність лінійних і кутових відстаней між сусідніми відмітками від міряної величини. За характером шкали розрізняють: рівномірні, нерівномірні, степеневі, логарифмічні.

4. Зміст і призначення метричних шкал

Розглянемо шкали електричних приладів. Для прямих мірянь електричних величин властиві рівномірні та нерівномірні шкали, які будуються за допомогою заздалегідь заданої міри, шляхом її багатократного відтворення за відповідним законом.

Ознакою непрямих мірянь значень електричних величин є функція перетворення і градуювальна характеристика. Функція перетворення - функціональна залежність між інформативними параметрами вихідного y та вхідного x сигналів міряльного засобу ($y=\varphi(x)$, рис.1).

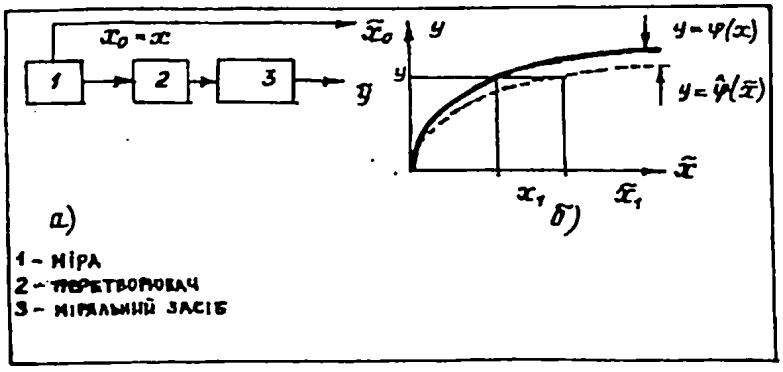

Рис. 1. До пояснення побудови шкали приладів непрямих мірянь:
а) градуювання перетворювача;
б) функція перетворення $y=\varphi(x)$ та градуювальна характеристика $y=\hat{\varphi}(\tilde{x})$ аналогового перетворювача.

У результаті градуювання, на основі зіставлення y та x_0 (значення міри) перетворювачу приписується залежність між вхідним та вихідним сигналами $y=\hat{\varphi}(x)$. Останню залежність можна використовувати для оцінки значення вхідної міряної величини x за відомим значенням y. У цій якості залежність $y=\hat{\varphi}(x)$ розглядають як градуювальну $y=\hat{\varphi}(\tilde{x})$.

Нехай потрібно поміряти невідому апріорі величину $x=x_1$. Остання перетворюється в y_1. За значенням y_1 за допомогою градуювальної характеристики $y=\hat{\varphi}(\tilde{x})$ знаходять оцінку $\tilde{x}_1$ (рис.1). Із-за невідповідності функції перетворення та градуювальної залежності має місце помилка перетворення $\Delta x=\tilde{x}_1-x_1$.

Висновок

Згідно методів та алгоритмів міряння, шкалу міряльного приладу доцільно означити як сукупність відміток поділок і цифр, розташованих у певній послідовності, які відповідають ряду числових значень міряної величини, отриманому за алгоритмом багатократного відтворення міри. Враховуючи те, що міра може бути детермінованою постійною (Δ=const), непостійною ($\Delta\neq$const), випадковою (Δ=rand), аналітично шкалу приладу можна записати:

$$X(s)=\sum_i \delta(s-s_i),$$

$$\delta(s-s_i)=\begin{cases}\infty & \text{при } s=s_i\\ 0 & \text{при } s\neq s_i\end{cases}.$$

Summary. The stages of forming the physical values units systems is considered. Physical meaning of scales in measuring theory is analyzed. The measure and scale understanding is shown with the correlation of the scale construction context. The notion of scale is defined by the construction algorithm and its analytical equation.

Література

1. Маликов М.Ф. Основы метрологии. - М.: Коммерприбор, 1949.-327с.
2. Джелепов В.С., Шестопалов С.А. Ядерно-спектроскопические нормали.- М.: Атомиздат, 1980.- 232 с.
3. Рудзит Я.А., Плуталов В.Н. Основы метрологии и надежность в приборостроении.- М.: Машиностроение, 1991.- 304 с.
4. ГОСТ 8.022-75. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений силы постоянного электрического тока.
5. ГОСТ 8.183-76. ГСИ Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений силы тока 2x10-25А в диапазоне частот 40-10 Гц.
6. ГОСТ 8.132-74.ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений силы тока 0,04-300 А в диапазоне частот 0,1-300 мГц.
7. ГОСТ 8.027-81.ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений электродвижущей силы и постоянного тока.
8. ГОСТ 8.184-76.ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений напряжения 0,001 - 1000 В в диапазоне частот 20 - 3x10 Гц.
9. Електричні вимірювання електричних та неелектричних величин / За ред. С.С.Поліщука. - Київ: Вища школа, 1978.- 352 с.
10. Державний стандарт України Метрологія. Терміни та визначення. Перша редакція.- Київ:1993.-69 с.
11. Кнорринг В.Т. Теоретические основы информационно-измерительной техники. Основные понятия теории шкал.-Л.:Изд-во ЛПИ, 1983.- 44с.
12. Берка К. Измерения. Понятие, теория, проблемы. -М.:Прогресс, 1987. - 320 с.