

The article is devoted to improving the methods for building throttle diagrams of gas-hydrodynamic measuring transducers of physical and mechanical parameters of fluids. The authors reviewed modern throttle transducers of various parameters, built on different diagrams, with different numbers and types of throttle elements, with different output signals. We established that the goodness of the measuring transducer is determined both by the structural diagram and the design characteristics of the throttle elements of a specific measuring diagram. The article proposes using structural synthesis with parametric optimization to achieve the specified characteristics of the gas-hydrodynamic transducers.

The aim is to develop an effective method for building throttle diagrams of gas-hydrodynamic measuring transducers of physical and mechanical parameters of fluids using structural optimization of diagrams and to evaluate each diagram using parametric optimization methods with the appropriate criterion that quantifies the goodness of the measuring transducer.

To achieve this goal, the authors analyzed the criteria and resources of structural and parametric optimization of gas-hydrodynamic transducers. In particular, the following resources of structural synthesis of measuring transducers' diagrams are analyzed: diagram order and throttle arrangement, type of throttles, output signals, supply mode of the transducer. Approaches to parametric optimization of throttle diagrams are offered: based on the mathematical model, one defines the objective function, forms restrictions on variable and fixed values, substantiates optimization parameters, chooses the optimization method.

As a result of the research, the authors developed a technique for structural and parametric optimization of gas-hydrodynamic measuring transducers, making it possible to synthesize throttle diagrams and build mathematical models of transducers of specific parameters of the fluid with optimal characteristics.

Keywords: structural synthesis; parametric optimization; throttle transducer.

*Надійшла до редакції
23 вересня 2021 року*

*Рецензовано
30 жовтня 2021 року*

УДК 681.26

АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ ПОХИБКИ ВАЖІЛЬНИХ СИЛОВІДТВОРЮЮЧИХ УСТАНОВОК

Ціпоренко О. В.

Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»), Київ, Україна

E-mail: tsiporenko@gmail.com

Державні еталони є основою технічної бази державної метрологічної системи. Створення державного первинного еталону одиниці сили вирішує такі завдання, як забезпечення єдності вимірювань сили, передавання розміру одиниці сили із необхідною точністю, метрологічне забезпечення численного парку робочих еталонів і робочих засобів вимірювальної техніки, що застосовуються в Україні та країнах ближнього зарубіжжя. Одним з основних етапів створення державного еталона є розробка математичної моделі процесу відтворення розміру одиниці фізичної величини, а саме Н – ньютонів. Силівідтворюючі установки, що застосовуються калібрувальними лабораторіями як правило, простежуються до національного еталонів через зв'язання за допомогою прецизійних перетворювачів сили.

Калібрування силівимірювальних приладів, як правило, буде проводитися на цих установках відповідно до документованої процедури, наприклад ISO 376, і складові похибки та невизначеності результатів калібрування будуть залежати від калібрувальних та вимірювальних можливостей установок відтворення розміру одиниці сили. Аналогічно, похибка результатів вимірювання при калібрування промислового обладнання, що вимірює силу, буде частково залежати від невизначеності та похибки, що виникає від приладу для вимірювання сили, і похибка будь-якого подальшого вимірювання сили частково залежатимуть від похибки, пов'язаної з відтворенням одиниці сили, у тому числі і національним еталоном. Можна помітити, що похибка та невизначеність остаточного вимірювання сили залежить від усіх попередніх етапів вимірювання, і ця робота має на меті дати рекомендації щодо того, як можна оцінити ці внески.

Метою даного дослідження є аналіз складових похибки багатоважільних силовідтворюючих установок, що входять до складу державного еталона. У роботі проаналізовано метод відтворення, зберігання та передачі розміру одиниці сили, установками важільного підсилювання, які можуть застосовуватися у якості еталонних метрологічними інститутами та калібрувальними лабораторіями. Розглянуто основні принципи роботи зазначених вище еталонних установок та створено математичну модель відтворення розміру одиниці сили.

Ключові слова: сила; вимірювання; похибка вимірювання; важільна установка; математична модель.

Вступ. Постановка проблеми

Важко назвати галузь вимірювань, більш поширену у світі, ніж вимірювання маси у науці, промисловості, торгівлі, побуті. Основою усіх сучасних ваговимірювальних приладів є перетворювачі сили [1].

Враховуючи також традиційні галузі вимірювань сили під час визначення характеристик міцності матеріалів, досліджень сили тяги двигунів у аерокосмічній галузі та авіаційній промисловості тощо, стає зрозумілою важливість забезпечення єдності вимірювань сили у країні. Після розпаду Радянського Союзу державний первинний еталон одиниці сили СРСР перейшов у власність Російської Федерації. Фактично Україна залишилась без системи забезпечення єдності вимірювання в галузі сили та незалежності її від зовнішніх факторів, у тому числі і політичних. Отже створення національного еталону одиниці сили та побудова системи забезпечення єдності вимірювань шляхом нерозривного ланцюга калібрувань від еталону робочим засобам вимірювальної техніки є важливою задачею для промисловості і економіки України.

На практиці для вимірювання сили застосовуються динамометри – прилади, що умовно складаються з пружного елемента та відлікового пристрою. Сучасні динамометри дозволяють вимірювати значення сили до 50 МН. Для калібрування динамометрів використовуються еталонні силовідтворюючі установки різних класів, які відтворюють, зберігають та передають розмір одиниці сили [2].

Метою роботи є створення математичної моделі відтворення, зберігання та передавання розміру одиниці сили та аналіз складових похибки силовідтворюючих установок багатоважільного класу для подальшого створення державного еталону одиниці сили у діапазоні відтворення одиниці сили до 200 кН.

Визначення терміну сила

Основними силами в механіці є вага, сила пружності, сила тертя, сила тяжіння, сила реакції опори, сила Архімеда та інші зумовлені двома фундаментальними взаємодіями – гравітаційними та електромагнітними. Проте, запис коректних формул для обчислення цих сил (особливо на основі законів електромагнетизму) є надзвичайно складною математичною задачею [3].

В механіці для визначення таких сил використовують формули, які є результатом скрупульозних експериментальних досліджень; в цих форму-

лах електромагнітні взаємодії «заховані» в кінематичних та динамічних характеристиках тіла та середовища, у якому тіло знаходиться. До цих похідних сил відноситься вага – сила, з якою тіло, внаслідок притягання до Землі, діє на опору або розтягує підвіс. Якщо опора (підвіс) нерухома або рухається рівномірно і прямолінійно відносно Землі, то вага дорівнює силі тяжіння. Якщо опора є горизонтальною, то вагу можна означити і як силу пружності у взаємодії тіла з опором. Якщо опора – похила площина, то вага тіла – рівнодійна сили пружності і сили тертя спокою, з якими тіло діє на опору. Вплив обертання Землі на вагу тіла є несуттєвим [4]. Сама вага є основою для створення всіх сучасних силовідтворюючих установок різних класів, у тому числі і важільних.

У сучасній метрологічній практиці вища точність відтворення одиниці сили забезпечується установками безпосереднього навантаження, розширена відносна невизначеність яких на рівні національних еталонів не перевищує 0,001 %. Також у якості національних еталонів одиниці сили широкого застосування набули важільні силовідтворюючі установки. Завдяки застосуванню важелів із різними довжинами пліч власні габарити та маса таких машин багаторазово менше, ніж установок безпосереднього навантаження для аналогічних значень відтворюваних значень сили, що і посприяло широкому застосуванню таких машин. Відносна розширена невизначеність важільних машин може становити від 0,01 до 0,05% [5].

В Україні метрологічні та технічні характеристики еталонних силовідтворюючих установок були регламентовані стандартом СРСР [6] зі зміною № 1 від 28.06.1998. Відповідно до цього стандарту для машин нормуються такі основні метрологічні параметри: межі допустимої відносної похибки через важільну систему - 0,12% або 0,2%; систематична складова похибки: не повинна перевищувати 0,06% або 0,12%; середній квадратичний відхил відносної випадкової складової похибки (СКВ): не повинно перевищувати 0,05% або 0,1% Явно занижені та застарілі вимоги до точності важільних установок пояснюються давнім терміном розробки цього стандарту та внесення до нього змін. У той період у країнах колишнього СРСР були відсутні переносні засоби передачі розміру одиниці сили з необхідною точністю за допомогою яких можна було б підтвердити більш високу точність важільних машин. Ще в 1972 році опублікована робота [7], в якій проведено теоретичний ана-

ліз джерел похибки відтворення сили важільними машинами і доведено можливість зниження значення СКВ до (0,01-0,03) %.

Рівняння вимірювання сили

Розглянемо математичне рівняння відтворення розміру одиниці сили силовідтворюючими установками багатоважільного класу. Значення сили, що відтворюються установками навантаження важільного класу LTM2T та LTM20T, визначаються за формулою:

$$F = f(m_{ум.с.}; Q; t; \varphi; p), \quad (1)$$

$$F = m_{ум.с.} \cdot g \cdot Q \cdot \left(1 - \frac{\rho_{нов}}{\rho_{см}}\right), \quad (2)$$

де $m_{ум.с.}$ – маса умовних мір сили, кг; Q – передавальне відношення важільної системи первинного еталона; g – прискорення вільного падіння у місці встановлення еталону визначено уповноваженою організацією – Інститутом геофізики НАН України, м. Київ – і складає $9,81056 \text{ м/с}^2$ з граничною похибкою визначення цієї величини $\pm 0,00001 \text{ м/с}^2$; $\rho_{нов}$ – густина повітря, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $\rho_{см}$ – 8000 кг/м^3 – густина матеріалу мір сили (умовно прийняте значення за [8]).

Густина повітря визначається за формулою СІРМ, що наведена в додатку Е [9]:

$$\rho_{нов} = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot \varphi \cdot e^{0,061t}}{(273,15 + t)}, \quad (3)$$

де p – атмосферний тиск, гПа; φ – відносна вологість повітря, %; t – температура повітря, °С.

Підставляючи формулу (3) в (2), отримаємо математичну модель відтворення розміру одиниці сили у загальному вигляді:

$$F = m_{ум.с.} \cdot g \cdot Q \cdot \left(1 - \frac{0,34848p - 0,009\varphi e^{0,061t}}{(273,15 + t)\rho_{см}}\right) \pm \Delta_{тр}, \quad (4)$$

де $\Delta_{тр}$ – похибка простежуваності, яка визначається за формулою:

$$\Delta_{тр} = \theta \pm t_s \cdot S, \quad (5)$$

де θ – невилучена систематична складова похибки; t_s – коефіцієнт Стюдента; S – випадкова складова похибки.

У свою чергу, для визначення границь відносної невилученої систематичної складової похибки для кожного ступеня відтворення розміру одиниці сили можна записати:

$$\theta_j = \pm 1,4 \cdot \frac{1}{F_j} \cdot \sum \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta_i = \frac{\partial f}{\partial m} \cdot \Delta_m + \frac{\partial f}{\partial g} \cdot \Delta_g + \frac{\partial f}{\partial Q} \cdot \Delta_Q + \frac{\partial f}{\partial p} \cdot \Delta_p + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \cdot \Delta_\varphi + \frac{\partial f}{\partial t} \cdot \Delta_t, \quad (6)$$

де F_j – значення розміру одиниці сили, що відтворюється установкою на j -му ступені.

Визначення маси умовних мір сил та СКВ випадкової складової похибки результату вимірювання маси умовних мір сили

За допомогою лабораторних ваг еталонних 2-го розряду (далі – компаратор) та гир еталонних 2-го розряду відповідних номінальних мас проводяться вимірювання маси умовних мір сили, за методикою, передбаченою для даного типу ваг. Для кожної умовної міри сили виконуються 10 послідовних зважувань. Для кожної умовної міри сили обчислюється її маса, як середнє значення результатів вимірювань, за формулою:

$$\bar{m}_{ум.с.ij} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_{ум.с.ij}, \quad (7)$$

де $m_{ум.с.ij}$ – маса умовної міри сили i -му зважуванню; n – кількість вимірювань маси умовної міри сили.

СКВ результату вимірювання маси умовних мір сили, в кг, обчислюється за формулою:

$$S_{jm_{ум.с.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=10} \left(m_{ум.с.ij} - \bar{m}_{ум.с.ij}\right)^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (8)$$

Визначення передавального відношення важільної системи та СКВ результату вимірювання передавального відношення важільної системи

Передавальне відношення важільної системи визначається безпосереднім навантаженням силовідтворюючої установки: для установки навантаження LTM2T у точках 200 кг, 400 кг, 600 кг, 800 кг, 1000 кг, 1200 кг, 1400 кг, 1600 кг, 1800 кг, 2000 кг, для установки навантаження LTM20T у точках 2000 кг, 4000 кг, 6000 кг, 8000 кг, 10000 кг, 12000 кг, 14000 кг, 16000 кг, 18000 кг, 20000 кг. Для визначення передавального відношення важільної системи використовуються еталонні гирі М1 за [9] розряду номінальною масою 20 кг загальною масою 20000 кг. Дійсне значення маси яких попередньо визначається за допомогою ваги лабораторної 2-го розряду (компаратора) та еталонної гирі 2-го розряду номінальною масою 20 кг. Для цього необхідно розмістити рівномірно на двох піддонах, які розташовуються симетрично відносно силовідтворюючої платформи за допомогою коромисла, необхідну кількість гир еталонних, попередньо визначивши їх дійсну масу $m_j^{нн}$, врівноважуючи їх на довгому плечі необхідною кількістю умовних мір сили та гир еталонних 2-го розряду (маса умовних мір сили та гир необхідних для врівноваження важільної системи $m_{ji}^{оп}$ заноситься до протоколу атестації), поки покажчик рівноваги не встановиться у нульовому положенні.

При визначенні передавального відношення важільної системи виконують 10 серій спостережень (номера серій позначають індексом i). Кожна

серія спостережень містить по 5 вимірювань на 10 рівномірнорозподілених ступенях навантаження при зростанні та зменшенні навантаження. Номера ступенів навантаження позначаються індексом j . Після кожної серії спостережень перевіряють повернення показника рівноваги в нульове положення. За необхідності встановлюють положення рівноваги тарувальним пристроєм. За результатами вимірювань визначається значення передавального відношення важільної системи еталона за формулою:

$$Q_{ji} = \frac{m_j^{nl}}{m_{ji}^{ep}}, \quad (9)$$

де m_j^{nl} – маса гир на платформі на j -му ступені, кг; m_{ji}^{ep} – маса умовних мір сили та гир, необхідних для врівноваження платформи на j -му ступені, кг.

Значення передавального відношення установки важільної на j -му ступені навантаження визначається як середнє з 10-ти рядів спостережень за формулою:

$$\bar{Q}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{ji}. \quad (10)$$

СКВ результату вимірювань передавального відношення важільної системи визначається за формулою

$$S_{jQ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=10} (Q_{ji} - \bar{Q}_j)^2}{n(n-1)}}. \quad (11)$$

Визначення невилученої систематичної похибки (НСП) при відтворенні одиниці сили

Невилучена систематична похибка при відтворенні одиниці сили, обумовлена похибкою визначення маси умовних мір сили, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \theta_{m_{ум.с.}} &= \frac{\partial f(m_{ум.с.}; Q)}{\partial m} \cdot \Delta_m = \\ &= gQ \left(1 - \frac{0,34848p - 0,009\varphi e^{0,061t}}{(273,15+t) \rho_{cm}} \right) \Delta_m. \end{aligned} \quad (12)$$

Невилучена систематична похибка при відтворенні одиниці сили, обумовлена похибкою визначення прискорення вільного падіння, визначається за формулою

$$\begin{aligned} \theta_g &= \frac{\partial f(m_{ум.с.}; Q)}{\partial g} \cdot \Delta_g = \\ &= m_{ум.с.} Q \left(1 - \frac{0,34848p - 0,009\varphi e^{0,061t}}{(273,15+t) \rho_{cm}} \right) \Delta_g. \end{aligned} \quad (13)$$

Невилучена систематична похибка при відтворенні одиниці сили, обумовлена похибкою визначення передавального відношення важільної системи, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \theta_Q &= \sqrt{\left(\frac{\partial f(m^{nl}; m^{ep})}{\partial m^{nl}} \Delta m^{nl} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(m^{nl}; m^{ep})}{\partial m^{ep}} \Delta m^{ep} \right)^2} = \\ &= g \left(1 - \frac{0,34848p - 0,009\varphi e^{0,061t}}{(273,15+t) \rho_{cm}} \right) \sqrt{(\Delta m^{nl})^2 + (Q \Delta m^{ep})^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

де Δm^{nl} – похибка визначення маси гир на платформі; Δm^{ep} – похибка визначення маси умовних мір сили та гир, необхідних для врівноваження гир на платформі.

Невилучена систематична похибка при відтворенні одиниці сили, обумовлена похибкою визначення атмосферного тиску, визначається за формулою

$$\theta_p = \frac{\partial f(m_{ум.с.}; Q)}{\partial p} \cdot \Delta p = \frac{0,34848 m_{ум.с.} g Q}{(273,15+t) \rho_{cm}} \Delta p. \quad (15)$$

Невилучена систематична похибка при відтворенні одиниці сили, обумовлена похибкою визначення відносної вологості повітря, визначається за формулою:

$$\theta_\varphi = \frac{\partial f(m_{ум.с.}; Q)}{\partial \varphi} \cdot \Delta \varphi = \frac{0,009 m_{ум.с.} g Q e^{0,061t}}{(273,15+t) \rho_{cm}} \Delta \varphi. \quad (16)$$

Невилучена систематична похибка при відтворенні одиниці сили, обумовлена похибкою визначення температури повітря, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \theta_t &= \frac{\partial f(m_{ум.с.}; Q)}{\partial t} \cdot \Delta t = \\ &= m_{ум.с.} g Q \left[\frac{(0,009\varphi e^{0,061t})(273,15+t)}{(273,15+t)^2 \rho_{cm}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(0,34848p - 0,009\varphi e^{0,061t})}{(273,15+t)^2 \rho_{cm}} \right] \Delta t, \end{aligned} \quad (17)$$

За невилучену систематичну похибку первинного еталона при відтворенні одиниці сили через важільну систему приймається найбільше значення НСП із усіх ступенів відтворення одиниці сили.

Визначення СКВ результату вимірювань при відтворенні одиниці сили

СКВ результату вимірювань при відтворенні одиниці сили на кожному j -му ступені відтворення визначається за формулою:

$$S_j = \sqrt{\sum_{k=1}^i \frac{\partial f}{\partial Y_i} S_{ij}^2} \cdot 100\%, \quad (18)$$

де $\frac{\partial f}{\partial Y_i}$ – часткова похідна по Y_i -тій вхідній величині; S_{ij}^2 – середній квадратичний відхил i -ої вхідної величини на j -му ступені відтворення.

СКВ результату вимірювань маси умовних мір сили визначається за формулою:

$$S_{jm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=10} (m_{ij} - \bar{m}_j)^2}{n(n-1)}}. \quad (18a)$$

СКВ результату вимірювань передавального відношення важільної системи визначається за формулою

$$S_{jQ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=10} (Q_{ij} - \bar{Q}_j)^2}{n(n-1)}}. \quad (19)$$

СКВ результату вимірювань при відтворенні одиниці сили визначається за формулою

$$S_j = \frac{g \left(1 - \frac{0,34848p - 0,009\varphi e^{0,061t}}{(273,15+t)\rho_{cm}} \right)}{F_j} \times \sqrt{Q_j^2 \sum_{k=1}^j S_{kjm.c.}^2 + m_{ум.с.}^2 S_{jQ}^2} 100\%. \quad (20)$$

За СКВ результату вимірювань при відтворенні одиниці сили через важільну систему приймається найбільше значення СКВ із усіх ступенів відтворення.

Таким чином, для визначення сили, відтворюваної еталоном, необхідно точно визначити масу мір сили та умовних мір сили, використовуваних у складі еталону, прискорення вільного падіння та виштовхуючу силу повітря (густину, температуру та відносну вологість повітря) у місці встановлення еталону.

За виразами (1) – (20) розраховано складові невилученої систематичної та випадкової похибки відтворення розміру одиниці сили, що дозволило визначити їх числові значення наведені нижче.

Границі відносної похибки визначення маси мір сили не перевищують 0,0002 %.

Гранична відносна похибка визначення передавального відношення важільної системи за результатами проведених досліджень складає:

- для установки LTM2T – 0,001 %
- для установки LTM20T – 0,001 %

Таким чином, за розрахунковими даними, – невилучена систематична похибка еталону становитиме:

- для установки LTM2T – 0,005 %;
- для установки LTM20T – 0,005 %;
- середньоквадратичний відхил результату 10-ти незалежних вимірювань не становитиме:
- для установки LTM2T – 0,002 %;
- для установки LTM20T – 0,002 %.

Похибка передавання розміру одиниці сили робочим еталонам залежить від наступних умов вимірювань:

- прикладення зусилля вздовж геометричної вісі робочого еталону, що піддається калібруванню;
- дотримання умов навколишнього середовища, регламентованих для первинного та робочих еталонів;

– дотримання регламентованого швидкісного режиму навантаження та розвантаження.

Оцінка коливання цих умов показує, що похибка передавання розміру одиниці сили від первинного еталону робочим еталонам не перевищує 0,002 % [10].

Висновки

Створення державного первинного еталону одиниці сили на підґрунті методу важільного підсилювання вирішує такі завдання, як забезпечення єдності вимірювань сили, передавання розміру одиниці сили з потрібною точністю, метрологічне забезпечення численного парку робочих еталонів і робочих засобів вимірювальної техніки. Результати ретельного аналізу чинників, що впливають на точність відтворення розміру одиниці сили дозволяють стверджувати, що у важільних установок є «запас міцності» і можливе підвищення точності без технічної модернізації.

Подальші звершення державного первинного еталону з державними еталонами провідних країн світу, а також участь у міжлабораторних зверненнях результатів калібрування (вимірювання) забезпечать простежуваність відтворюваного значення одиниці сили до міжнародної системи SI. Це є кроком до міжнародного визнання результатів вимірювань сили в Україні.

Література

- [1] A. Hunt, *A guide to the Measurement of Force*, London, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] T. Anderegg, W. Honegger, W. Sennhauser, R. Kumme, A. Sawla, “Developing and calibration of a build-up system for force of up to 21 MN”, in *Proc. of the 16th IMEKO TC3/APMF '98 International Conference on Force*, Taejon (Südkorea), 1998, pp. 45-53
- [3] J. Illemaan, R. Kumme, *The traceability of the quantity force from National Standard Machines to industrial applications*, 2006, NPL of India, New Delhi.
- [4] Hung D Young, Roger A Freedman, *Sears & Zemansky's university physics*. Upper Saddle River: Pearson, 2020, pp. 18-38.
- [5] EURAMET cg-4 Uncertainty of Force Measurements, Version 2.0 (03/2011).
- [6] ГОСТ 25864-83. Машины силоизмерительные образцовые 2-ого разряда. Общие технические требования. С изменением № 1 от 28.06.1998 г.
- [7] Г. И. Леонов, “Анализ погрешностей образцовых рычажных силоизмерительных машин”, *Метрология*, № 11, pp. 32-40, 1972.
- [8] OIML R 33 Conventional value of the result of weighing in air, Edition 1979 (E).
- [9] OIML R 111-1 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 Part 1:

Metrological and technical requirements, Edition 2004 (E).
[10] A. Sawla, "Uncertainty scope of the force

calibration machines", in *Proc. of the IMEKO XVI World Congress*, Vienna, Austria, 2000, Volume III, TC-3, pp. 253-258.

УДК 681.26

А. В. Ципоренко

Государственное предприятие «Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей»

(ГП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»), Киев, Украина

АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТИ РЫЧАЖНЫХ СИЛОВОСПРОИЗВОДЯЩИХ УСТАНОВОК

Государственные эталоны являются основой технической базы государственной метрологической системы. Создание государственного первичного эталона единицы силы решает такие задачи как обеспечение единства измерений силы, передача размера единицы силы с необходимой точностью, метрологическое обеспечение многочисленного парка рабочих эталонов и рабочих средств измерительной техники, применяемых в Украине и странах ближнего зарубежья. Одним из основных этапов создания государственного эталона является разработка математической модели процесса воспроизведения размера единицы физической величины, а именно Н – Ньютона. Силосовпроизводящие установки, применяемые калибровочными лабораториями, как правило, прослеживаются к национальному эталону через сверку с помощью прецизионных преобразователей силы. Калибровка силоизмерительных приборов, как правило, будет производиться на этих установках в соответствии с документированной процедурой, например ISO 376, и составляющие погрешности и неопределенности результатов калибровки будут зависеть от калибровочных и измерительных возможностей установок воспроизведения размера единицы силы. Аналогично, неопределенность калибровки измеряющего силу промышленного оборудования будет частично зависеть от неопределенности, возникающей от прибора для измерения силы, и неопределенности любого дальнейшего измерения силы частично будут зависеть от неопределенности, связанной с воспроизведением единицы силы, в том числе и национальным эталоном. Можно видеть, что неопределенность окончательного измерения силы зависит от всех предыдущих этапов измерения, и эта работа дает рекомендации относительно того, как можно оценить эти взносы.

Целью данного исследования является анализ составляющих погрешности силосовпроизводящих установок многорычажного типа, входящих в состав государственного эталона. В работе проанализирован метод воспроизведения, хранения и передачи размера единицы силы, установками рычажного усиления, которые могут применяться в качестве эталонных метрологическими институтами и калибровочными лабораториями. Рассмотрены основные принципы работы указанных выше эталонных установок и создана математическая модель воспроизведения размера единицы силы.

Ключевые слова: сила; измерение; погрешность; неопределенность измерения; рычажная установка; математическая модель.

О. Tsiporenko

State Enterprise "All-Ukrainian State Research and Production Center for Standardization, Metrology, Certification and Consumers' Rights Protection" (SE "Ukrmetrteststandart"), Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE ERROR COMPONENTS OF LEVER TYPE FORCE-GENERATING MACHINES

The national standards are the basis of the technical base of the state metrological system. The developing of a national primary standard of force unit solves such tasks as ensuring the uniformity of force measurements, transmitting the size of a unit of force with the required accuracy, metrological support of a large fleet of working standards and measuring instruments used in Ukraine. One of the main stages in the creation of the national standard is the development of a mathematical model of the process of reproducing the unit size of a physical quantity, namely N - Newton. The purpose of this study is to analyze the components of the error of force-generating installations of the multi-lever type, which are part of the national standard. Force generating installations used by calibration laboratories are usually traced to national standards through verification using precision force transducers. Calibration of force measuring instruments will typically be performed on these installations according to a documented procedure, such as ISO 376, and the components of error and uncertainty of calibration results will depend on the calibration and measurement capabilities of the unit size reproduction. Similarly, the uncertainty of the calibration of industrial force measuring instruments will depend in part on the uncertainty contributing by the force measuring instrument, and the uncertainty of any subsequent force measurement will depend in part on the uncertainty associated with the reproduction of a unit of force, including na-

tional standard. It can be seen that the uncertainty of the final strength measurement depends on all previous stages of the measurement, and this work aims to make recommendations on how these contributions can be estimated.

The purpose of this study is to analyze the components of the error of power plants of the multi-lever type, which are part of the state standard. The paper analyzes the method of reproduction, storage and transmission of the unit size, lever reinforcement installations, which can be used as reference metrological institutes and calibration laboratories. The basic principles of operation of the above reference installations are considered and the mathematical model of reproduction of the size of unit of force is created.

Key words: force; measurement; error; measurement uncertainty; lever installation; mathematical model.

Надійшла до редакції
01 жовтня 2021 року

Рецензовано
04 листопада 2021 року

UDC 681.121

ULTRASONIC MEASUREMENT TECHNOLOGY IN AUTOMATED CONTROL OF WATER RESOURCES

Gryshanova Iryna

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine

E-mail: irgryshanova@gmail.com

Control of water resources is becoming an important strategic issue. That is why authorities set the goal for water agencies to manage the availability of water and create regulations to its rational use. The main point in water control is measurement. There are three important aspects of measurements of water resources: at water extraction from nature, at the consumption and at custody transfer. Control of water consumption sometimes is based not on measurements, but on preliminary estimation, for example, by pumping.

Ultrasonic measurement technology as a key feature of automated control of resources has a potential role in this market. In contrast to mechanical (turbine) meters, ultrasonic meters have a priority because they also give a possibility to realize smart metering. In contrast to electromagnetic meters, which also measure with high accuracy and realize smart functions, ultrasonic meters much more suitable for rough water, wastewater and sewage. Such water resources are usually poorly controlled, which means that no one knows their exact cost.

Measurement is mandatory to control cost and for billing. Accuracy is important issue, especially when we say about measurements in large pipe diameters. There is practically no alternative to ultrasonic flow meters. Market of diverse meters concentrated on diameters under 400 mm. For larger diameters, only ultrasonic meters are in use. They have many chords, difficult algorithms for data processing. Thus, they are applicable over a very wide flow range.

In this paper, we discover transit-time ultrasonic flow meters to understand features of their measurement theory taking into account all factors affecting their work. This article describes errors inherent in these flowmeters during measurements.

As far as accuracy is significantly important in billing, the cost of 1% measurement error in consumption of water resources for small (DN50÷DN150 mm) and large (DN200÷DN1200 mm) pipe diameters has been evaluated and analyzed. The losses from the installation of low-quality metering devices are demonstrated and discussed.

Keywords: water resources; ultrasonic flow meter; measurement accuracy; measurement error.

Introduction. Formulation of the problem

The United Nations estimates that at least 780 million people in the World do not have access to clean drinking water; some 2.5 billion people lack access to safe sanitation systems [1]. That is why authorities set the goal for water agencies to manage the availability of water resources and create regulations to its rational use.

Providing an adequate water supply is a major challenge facing many public water utilities, especially in developing countries. A significant part of this challenge is non-revenue water, which is the difference between the volume of water put into a water distribution system and the volume that is billed to customers. It is estimated that water utilities in developing countries can lose 40-50% of the water they put