

Conclusions. The proposed algorithm for choosing the ratio of frequency modulation and quantization frequencies can improve the accuracy and resolution of distance measurement, due to the possibility of changing the quantization frequency and the weight of the electronic scale. The introduction of digital signal processing and the integration of the dedicated phase-frequency range increases the resistance of the meter to the noise effects of the external environment and the configuration of the object of study on the parameters of the light flux.

Keywords: modulation light range finder; distance; phase-frequency conversion; quantization frequency; measurement accuracy; resolution.

Надійшла до редакції
14 вересня 2020 року

Рецензовано
29 вересня 2020 року

УДК 681.26

ЕТАЛОННА БАЗА ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ

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*

Вимірювання сили є важливим аспектом при випробуваннях та визначеннях характеристик агрегатів, деталей машин та матеріалів, будівельних матеріалів і конструкцій, якості металургійної продукції, а також під час оцінки відповідності перетворювачів сили та ваги. Метою даного дослідження є вибір оптимальної схеми та методології відтворення, зберігання та передавання розміру одиниці сили в країні, а також забезпечення її простежуваності до міжнародної системи одиниць вимірювань SI.

У роботі проаналізовано сучасні методи відтворення, зберігання та передачі розміру одиниці сили, а саме еталонні установки безпосереднього навантаження, гідравлічного підсилювання, важільного підсилювання та системи (групи) декількох перетворювачів сили, які можуть застосовуватися у якості еталонних метрологічними інститутами та калібрувальними лабораторіями. Розглянуто основні принципи роботи зазначених вище еталонних установок відтворення розміру одиниці сили, включаючи складові невизначеності вимірювання та природу їх походження із можливістю подальшого врахування при складанні бюджету невизначеності. Це дозволить в подальшому більш ретельно підійти до створення математичної відтворення розміру одиниці сили та планування експериментальної частини подальшого дослідження. Проаналізовано калібрувальні та вимірювальні можливості провідних світових метрологічних установ, які зберігають різні класи еталонних установок відтворення розміру одиниці сили, а саме діапазони відтворення розміру, невизначеності вимірювання, особливості експлуатації, габаритні розміри тощо.

Обґрунтовано доцільність створення державного еталона одиниці сили на підґрунті методу важільного підсилення, завдяки забезпеченню високої точності, компактності у порівнянні із іншими класами установок і легкості обслуговування, що дозволить посісти гідні позиції серед провідних світових метрологічних інституцій.

Ключові слова: сила; вимірювання; динамометр; невизначеність вимірювання; важільна установка; груповий метод.

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 міц-

ності 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 галу-

зі 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 виміральної 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 силовимірювальні машини, які відтворюють, зберігають та передають розмір одиниці сили.

Метою роботи є аналіз сучасних методів відтворення, зберігання та передачі розміру сили в світі та обґрунтування вибору методу для подальшого створення державного еталона одиниці сили у діапазоні відтворення одиниці сили до 200 кН.

Аналіз сучасної еталонної бази вимірювання сили

Національні еталонні силовимірювальні машини (force standard machine) можна розділити на дві категорії:

- 1) машини, в яких відтворювані значення сили підлягають калібруванню за допомогою еталонів передавання від інших силовимірювальних машин;
- 2) машини, в яких відтворювані значення сили обчислюються з математичної моделі системи відтворення одиниці сили [2]. Такі машини умовно поділяються на наступні класи:
 - установки безпосереднього навантаження (deadweight);
 - установки гідравлічного підсилення (hydraulic amplification);
 - важільні установки (lever amplification);
 - з системою декількох перетворювачів (multiple transducer system).

Установки безпосереднього навантаження (deadweight). Вертикальна сила (F), створювана вагою вантажів у гравітаційному полі Землі визначається за виразом

$$F = mg \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right), \quad (1)$$

де m – маса вантажів, кг; ρ_m – густина вантажів, кг·м⁻³; ρ_a – густина повітря, кг·м⁻³; g – прискорення вільного падіння, м·с⁻².

Невизначеності чотирьох змінних правої частини рівняння (1) можна об'єднати для визначення невизначеності розрахункового значення сили

$$\left(\frac{\sigma_F}{F} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_m} \right)^2 \times$$

$$\times \left[\left(\frac{\sigma_{\rho_m}}{\rho_m} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_a}}{\rho_a} \right)^2 \right], \quad (2)$$

де σ_x – стандартне відхилення; індекс вказує на параметр рівняння.

Невизначеність, пов'язана з кожним параметром, повинна враховувати його зміни в часі – густина повітря і прискорення вільного падіння будуть змінюватися протягом будь-якого дня, тоді як значення маси, ймовірно, буде піддаватися довготривалому дрейфу, викликаному зносом, забрудненням і нестабільністю поверхні [3].

У випадку, коли справжнє значення маси вантажу невідоме, але його умовне значення маси m_c є (тобто маса вантажу густиною 8 000 кг·м⁻³, що врівноважують у повітрі густиною 1,2 кг·м⁻³) – значення, вказане в сертифікаті про калібрування вантажів – рівняння (1) і (2) набувають виду:

$$F = m_c g \left[1 - \left(\frac{1,2}{8000} \right) + \left(\frac{1,2 - \rho_a}{\rho_m} \right) \right], \quad (3)$$

та

$$\left(\frac{\sigma_F}{F} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{m_c}}{m_c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g} \right)^2 + \left(\frac{1,2 - \rho_a}{\rho_m} \right)^2 \times \left[\left(\frac{\sigma_{\rho_m}}{\rho_m} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_a}}{1,2 - \rho_a} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Бюджет невизначеності для машини також повинен враховувати можливі механізми відтворення одиниці сили окрім сили тяжіння та виштовхувальної сили повітря, зокрема магнітні, електростатичні та аеродинамічні ефекти [4].

Для машин, у яких прикладена сила не є чистим безпосереднім навантаженням (наприклад, вага навантажувальної рамки аретується важелем і противагою), вплив будь-яких сил тертя чи неврівноваженості необхідно врахувати у бюджеті невизначеності, на кожне значення сили в межах діапазону відтворення одиниці сили машиною.

Невизначеність вимірювання, пов'язана зі значеннями сили, реалізованими в Національних Метрологічних Інститутах (НМІ), забезпечується за допомогою міжнародних звірень. Розширена відносна невизначеність вимірювання, з якою значення сили можуть бути відтворені за допомогою машин, що працюють в режимі безпосереднього навантаження, задекларована різними НМІ, не перевищує $1 \cdot 10^{-5}$ [5].

Однак, на практиці, при калібруванні тих самих еталонів передавання на різних машинах, відмінності між результатами часто можуть бути значно більшими, внаслідок механічної взаємодії між еталонами передавання та машиною. Це стало очевидним за результатами міжлабораторних звірень BCR та WECC, щодо калібрування еталонів пере-

давання, проведених відповідно у 1987 та 1991 роках [6].

Установки гідравлічного підсилення (hydraulic amplification). У машині з гідравлічним підсиленням сила, створювана безпосереднім навантаженням групою умовних мір сили, підсилюється за допомогою використання гідравлічної системи, що складається з малої та великої поршневої груп з різними ефективними площами, збільшуючи силу на коефіцієнт, приблизно рівний співвідношенню площ цих поршневих груп (рис. 1).

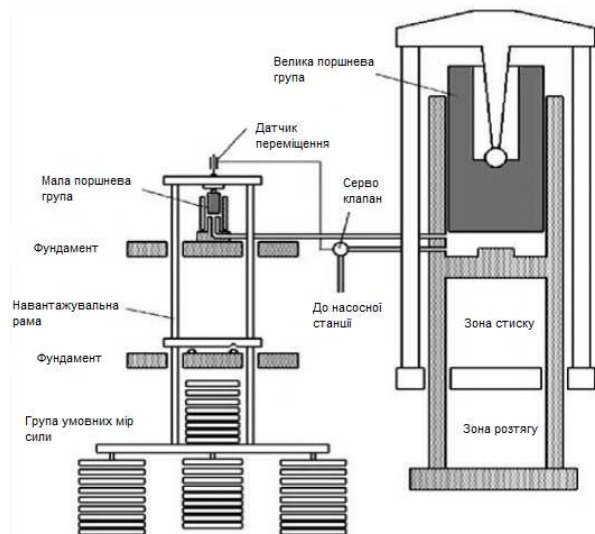


Рис. 1. Принципова схема установка гідравлічного підсилення [7]

Якщо простежуваність цієї більшої сили безпосередньо походить від одиниць SI, то невизначеність містить наступні складові, але не обмежується ними:

- сили, що створюється безпосереднім навантаженням (див. установки безпосереднього навантаження (deadweight));
- вимірювань геометричних розмірів поршня/циліндра;
- через перепади тиску в гідравлічному контурі, викликані потоком робочої рідини;
- від впливу температури на співвідношення площі пар поршень/циліндр (термічне розширення, можливо, з різними показниками) і перепаду тиску (залежність від температури та в'язкості робочої рідини);
- внаслідок пружної деформації поршневих/циліндрових вузлів;
- через нестабільність системи керування;
- внаслідок тертя/гістерезису в складі поршня/циліндра або в системах механічного керування;
- від встановлення початкової нульової точки сили.

За можливості, слід внести корективи для оціночного впливу будь-якого з цих компонентів на величину відтворюваної сили [7].

Важільні установки (lever amplification). У машині для підсилення значення сили використовується один або декілька механічних важелів, збільшуючи силу на коефіцієнт, що приблизно дорівнює відношенню довжин важелів.

Установка, що реалізує метод важільного підсилювання, складається з важеля з рухомою противагою, робочої та вантажної частин.

На принциповій схемі умовно зображені складові установки з одним важелем (рис. 2):

I – важіль з рухомою противагою 1, показчик 7 рівноваги та три призми (9 – опорна, 8 та 10 – вантажоприймальні);

робоча зона (II) складається з верхнього та нижнього загіскачів 2, що з'єднані коротким плечем важеля через призму 10, та електромеханічного приводу 4, що врівноважує важільну систему через динамометр 3, що підлягає калібруванню;

вантажна частина (III) складається із вертикальної штанги 6, з'єднаної із довгим плечем важеля через призму 8, піддона 5 для попереднього врівноважування динамометра та комплексу умовних мір сили P_1, P_2, P_3 , що створюють на короткому плечі важелю задане значення сили [8].

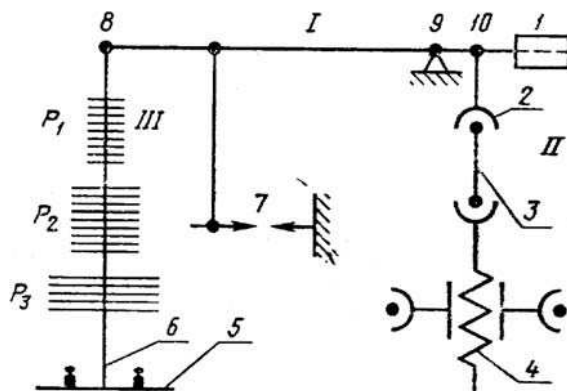


Рис. 2. Принципова схема важільної установки з одним важелем [8]: I – важіль з рухомою противагою; II – робоча частина; III – вантажна частина

Простежуваність цієї більшої сили безпосередньо впливає з одиниць SI [9], внески до бюджету невизначеності, які потрібно врахувати, включатимуть, але не обмежуються наступними невизначеностями:

- сили, що створюється безпосереднім навантаженням;
- розмірних вимірювань важільної системи;
- через тертя всередині важільних систем;
- від впливу температури на передавальне відношення важеля або системи важелів (температурне розширення);

- внаслідок впливу величини прикладеної сили на передавальне відношення важеля або системи важелів (пружне спотворення важеля);
- через нестабільність системи керування;
- вирівнювання створюваної сили з вимірною віссю еталона передавання;
- позиційної відтворюваності рухомих деталей;
- зношеності леза призми, якщо вона використовується.

Система декількох перетворювачів (multiple transducer system). Такі машини базуються на застосуванні групи силових перетворювачів, індивідуально каліброваних на еталонній силовимірвальній машині і потім навантажених паралельно. Відтворюване значення сили обчислюється як сума діючих сил, що вимірюються окремими перетворювачами. Для машин цього класу внески у бюджет невизначеності, які потрібно врахувати, включатимуть, але не обмежуються такими невизначеностями:

- калібрування окремих перетворювачів;
- вирівнювання перетворювачів з вимірною віссю сило відтворюючої машини під час калібрування;

- через стабільність/працездатність системи управління та методології збору і обробки результатів вимірювань.

Еталонні калібрувальні силовимірвальні машини

Еталонні калібрувальні силовимірвальні машини застосовуються калібрувальними лабораторіями, та знаходяться нижче від національного еталона за ієрархічною схемою і призначені для калібрування динамометрів та пристроїв вимірювання сили. На сьогодні існують два методи забезпечення простежуваності калібрувальних силовимірвальних машин і оцінки пов'язаних з ними невизначеностей [4]:

метод А: Калібрувальна машина отримує розмір одиниці сили безпосередньо від еталонів передавання, що були калібровані на національному еталоні.

метод В: Калібрувальна машина має незалежну простежуваність до одиниць SI, таких як маса, довжина, час.

Типові значення калібрувальних і вимірвальних можливостей (СМС), що досягаються цими силовимірвальними машинами в практичному застосуванні (калібрувальні та вимірвальні лабораторії), залежать від принципу відтворення одиниці сили (табл. 1).

Таблиця 1. Основні метрологічні характеристики силовідтворюючих установок [7]

Принцип дії силовимірвальної машини	Відносна розширена невизначеність
Установки безпосереднього навантаження (deadweight)	від $2 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
Установки гідравлічного підсилення (hydraulic amplification)	від $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$
Установки важільного типу (lever amplification)	від $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$
Система з декількох перетворювачів (multiple transducer system)	від $5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$

Невизначеність, з якою відтворюються значення сили безпосереднім навантаженням, може бути розрахована за методологією для національних еталонів та бути меншою за наведене у таблиці значення $1 \cdot 10^{-4}$. Однак, для демонстрації простежуваності та підтвердження такого значення невизначеності, необхідно брати участь у міжнародних звіреннях, що може бути як технічно, так і економічно недоцільним [3].

У більшості випадків потреби калібрувальних лабораторій задовольняються невизначеностями, що не перевищують $5 \cdot 10^{-4}$. Для гідравлічних і важільних силовимірвальних машин менші значення невизначеності можуть досягатися, шляхом введення коригувань, зумовлених систематичними складовими [10].

Одним із основних способів підтвердження метрологічних характеристик еталонів національ-

них метрологічних установ є участь у ключових або додаткових міжнародних звіреннях, які проводяться консультативними комітетами CIPM або регіональними метрологічними організаціями. Результати таких звірень, після відповідного погодження, вносяться до бази даних KCDB BIPM [11], та публікуються для загального доступу. Метрологічні характеристики еталонних установок деяких світових метрологічних установ, опубліковані у вищезгаданій базі даних, демонструють різні діапазони та невизначеності вимірювань, обумовлені у тому числі і фінансовими можливостями країни (табл. 2).

Висновки

Основний парк робочих засобів вимірвальної техніки, у яких сила є основною вимірюваною фізичною величиною, складають машини та при-

лади для визначення характеристик міцності матеріалів, динамометри і силовимірювальні пристрої у діапазоні вимірювання сили до 2 МН та розши-

реної відносної невизначеності вимірювань до 0,2 %, що окреслює вимоги до вибору методу відтворення розміру одиниці сили.

Таблиця 2. Метрологічні характеристики еталонів провідних метрологічних інститутів

№ з/п	Назва еталону та держава	Діапазон вимірювань	Розширена невизначеність U ($k=2$), %
1	Національний еталон одиниці сили Німеччини (PTB)	від 0,5 Н до 2 МН	0,002
2	Національний еталон одиниці сили Нідерландів (Nederlands Meetinstituut - Van Swinden Laboratorium)	від 2,5 кН до 250 кН	0,01
3	Національний еталон одиниці сили Польщі (GUM)	від 10 кН до 500 кН	0,006
4	Національний еталон одиниці сили Чеської Республіки (СМІ (Czech Metrology Institute))	від 0,5 кН до 150 кН	0,02
6	Національний еталон одиниці сили Угорщини (ОМН (Országos Mérésügyi Hivatal))	від 5 кН до 300 кН	0,02/0,03

Порівняльний аналіз різних класів силовимірювальних установок свідчить про наступне:

- установкам безпосереднього навантаження (Deadweight Force Machine), притаманні такі якості, як найвища точність, довготривала стабільність, що, в свою чергу, обумовлює високу вартість і великі габаритні розміри відповідного устаткування, а також суттєві вимоги до допоміжного обладнання (компаратор для визначення маси мір сили із найбільшою границею вимірювання до 2000 кг, абсолютний гравіметр, система акліматизації приміщення, де встановлено еталон);
- характерними особливостями установок гідравлічного підсилювання (Hydraulic amplification Machine) є широкий діапазон відтворення (до 16 МН), відносна компактність, що обмежуються відносно високою вартістю, наявністю гідравлічної системи, складністю періодичного обслуговування.
- установки важільного підсилювання (Lever amplification) відрізняються компактністю, достатньо високим рівнем точності, легкістю обслуговування, невисокою вартістю, при цьому мають обмежений діапазон відтворення (до 2 МН).

Отже для подальшого створення державного еталона одиниці сили і забезпечення простежуваності у цій галузі доцільно зупинитися на важільних установках, що повністю задовольняють потребам української промисловості в діапазоні вимірювання сили до 15 МН із розширеною відносною невизначеністю вимірювання, що не перевищує 0,2 %.

Створення державного первинного еталону одиниці сили на базі 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.

Звірення державного первинного еталону з державними еталонами провідних країн світу забезпечить простежуваність відтвореного значення одиниці сили до міжнародної системи SI. Це є кроком до міжнародного визнання результатів вимірювань сили в Україні.

Перспективою подальшої роботи є створення математичної моделі відтворення розміру одиниці сили і дослідження метрологічних характеристик важільних установок за допомогою еталонів передавання.

Література

- [1] A. Hunt, *A guide to the Measurement of Force*, London, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] EURAMET cg-4 Uncertainty of Force Measurements, Version 2.0 (03/2011).
- [3] 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.
- [4] G. Navrozidis, F. Strehle, D. Schwind, and H. Gassmann, "Operation of a New Force Standard Machine at Hellenic Institute of Metrology", in *Proc. 17th International Conference on Force, Mass, Torque and Pressure Measurements, IMEKO TC3*, Istanbul, 2001, pp. 119-128.
- [5] A. Sawla, M. Peters, EC – Intercomparison of Force Transducer Calibration. Brussels, Commission of the European Communities, Bureau of Reference, 1987.
- [6] Andy Knott, "Developments at NPL to improve calibration of force and torque", *Measurement + Control*, Vol. 37/8, pp. 246-251, 2004.
- [7] Г. И. Леонов, "Анализ погрешностей образцовых рычажных силоизмерительных машин", *Метрология*, № 11, 1972.
- [8] S. K. Jain, S. S. K Titus, Falk Tegtmeier, Norbert Tetzlaff, and Daniel Schwind, "Low uncertainty in force values achieved in a lever multiplication

deadweight force standard machine of 1 MN”, in XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, Busan, 2012.

[9] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISBN 92-67-1088-9 International

Organization for Standardization, 1995.

[10] BIPM KCDB <https://www.bipm.org/kcdb/> - The BIPM Key Comparison Database.

УДК 681.26

А. В. Ципоренко

Государственное предприятие «Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей» (ГП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»), Киев, Украина

ЭТАЛОННАЯ БАЗА ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ

Измерение силы является важным аспектом при испытаниях и определениях характеристик агрегатов, деталей машин и материалов, строительных материалов и конструкций, качества металлургической продукции, а также при оценке соответствия преобразователей силы и веса. Целью данного исследования является выбор оптимальной схемы и методологии воспроизведения, хранения и передачи размера единицы силы в стране, а также обеспечение ее прослеживаемости к международной системе единиц измерений SI. В статье проанализированы современные методы воспроизведения, хранения и передачи размера единицы силы, такие как эталонные установки непосредственного нагружения, установки гидравлического усиления, установки рычажного усиления и системы (группы) нескольких преобразователей силы.

Рассмотрены основные принципы работы приведенных выше эталонных установок воспроизведения единицы силы, включая составляющие неопределенности измерения и природу их происхождения с возможностью дальнейшего учета при составлении бюджета неопределенности. Сделаны выводы о создании государственного эталона единицы силы на базе установок рычажного усиления, основанные на результатах анализа методов воспроизведения и передачи размера единицы силы.

Ключевые слова: сила; измерения; динамометр; неопределенность измерения; рычажная установка; групповой метод.

О. Tsiporenko

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

STANDARDS IN FORCE MEASUREMENTS

Force measurement is an important aspect in testing and determining the characteristics of units, machine parts and materials, building materials and structures, the quality of metallurgical products, as well as when assessing the conformity of force and weight transducers. The purpose of this study is to select the optimal procedure and methodology for realization, storage and transferring of the unit size of force in the country, as well as to ensure its traceability to the international system of SI units. This paper analyzes existing methods of realization, storage and transferring of unit size, such as deadweight force standard machines, hydraulic amplification force standard machines, lever amplification force standard machines and systems (groups) of several force transducers (BU system) that can be used as reference by metrological institutes and calibration laboratories. The main principles of operation of the above mentioned machines of realization of a unit of force are considered, including the components of measurement uncertainty and the nature of their origin with the possibility of further consideration in the uncertainty budget. The calibration and measurement capabilities of the world's leading metrological institutions, which maintain different classes of force standard machines for reproducing the size of a unit of force, namely the measurement range, measurement uncertainty, as well as overall dimensions, operating features, etc. are analyzed. The results of the analysis of the disadvantages and advantages of the three main classes of force standard machines for reproducing the size of a unit of force are presented in this article. Conclusions are made on the creation of a national standard of the force unit based on the installation of lever amplification force standard machines, which are based on the analysis of methods of reproduction and transfer of the size of a unit of force, which will occupy positions among the world's leading metrological institutions.

Key words: force; measurement; dynamometer; measurement uncertainty; lever amplification; group method.

*Надійшла до редакції
28 вересня 2020 року*

*Рецензовано
02 жовтня 2020 року*