



УДК 534:321.9:534.6

ПРОСТЕЖУВАНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ

В.В. Паракуда, кандидат технічних наук, доцент, директор ДП “НДІ “Система”, м. Львів

В.П. Чалий, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник ДП “НДІ “Система”, м. Львів

Т.М. Ільницька, вчений секретар ДП “НДІ “Система”, м. Львів

І.Г. Кізілівський, начальник лабораторії ДП “НДІ “Система”, м. Львів



В.В. Паракуда



В.П. Чалий



Т.М. Ільницька



І.Г. Кізілівський

Розглянуто поняття “метрологічна простежуваність” як одне з фундаментальних понять у новій парадигмі метрології. На прикладі розроблення системи метрологічного забезпечення вимірювань потужності ультразвуку у водному середовищі (однієї з нових галузей вимірювань в Україні) показано особливості простежуваності як “робочого інструменту” для забезпечення єдності вимірювань і встановлення довіри до результатів вимірювань. Показано також, що повірка ще не забезпечує довіри до результатів вимірювань; для цього необхідно впровадження метрологічної простежуваності і подальше вдосконалення системи метрологічного забезпечення цієї галузі вимірювань. Подано практичні рекомендації.

The concept of “metrological traceability” as one of the fundamental concepts of the new paradigm of metrology is examined. The example of the development of metrological support system for the measurement of ultrasound power in a water medium (one of the new branches of measurements in Ukraine) shows features of traceability as a working tool for the ensuring the uniformity of measurement and the establishment of confidence to the measurement results. It is shown that verification itself does not ensure confidence to the measurement results. Implementation of metrological traceability and further improvement of metrological support of this branch of measurements is needed for this purpose. The practical recommendations are presented.

Вступ

Поняття “метрологічна простежуваність” – простежуваність результату вимірювань до еталонів системи одиниць SI – прийшло разом із появою нового підходу до оцінювання якості результату вимірювання – підходу з позиції невизначеності у вимірюванні (Uncertainty Approach), або концепції GUM (за іншими джерелами) на відміну від існуючого так званого класичного підходу (Classical Approach). Концепцію невизначеності викладено в основному у двох міжнародних основоположних документах: “Настанові з подання невизначеності у вимірюванні” [1] та в Міжнародному словнику основних понять і термінів з метрології [2]*. На їх основі за кордоном за ієрархічним принципом побудовано систему документації з метрології, яка включає і такий важливий міжнародний документ, як стандарт ISO/IEC 17025 [3]. Концепція GUM – це фактично нова парадигма метрології, свідками і співавторами

* На жаль, ні один із цих документів не перекладено на українську мову, хоча в Російській Федерації всі три частини “Настанови...” видано російською як державні стандарти (ГОСТ Р 54500.1-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009; ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2009; ГОСТ Р 54500.3.2-2013/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008/Дополнение 2:2011); перекладено на російську і Словник (Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины).

ми якої ми є. Характерною особливістю концепції GUM є зміщення акцентів процесу вимірювання і використання результатів у бік “людського фактора” – велике значення надається довірі до результату вимірювання, що відповідає 4-му фундаментальному принципу вимірювання [4]. Причому довіра до результатів вимірювання розглядається на всіх рівнях – від побутового до міжнародної співпраці [5]. Але у нас (на пострадянському просторі) концепція GUM і відповідно поняття метрологічної простежуваності сприймається і до сьогодні неоднозначно, не дивлячись на те, що від її появи минуло уже більше 20-ти років і її повсюдно впроваджено у світі.

Тому надзвичайно важливо всебічно розглянути це питання і продемонструвати основні особливості поняття “метрологічна простежуваність” на конкретному прикладі, наприклад, на процесі розроблення і впровадження в Україні системи метрологічного забезпечення однієї з нових галузей вимірювання – вимірювання потужності ультразвуку, випромінюваного у водному середовищі.

Основна частина

Ультразвук, що поширюється у водному середовищі, використовують у різних галузях економіки та соціальної сфери [6]. Та найбільше ультразвук, зокрема, мегагерцового діапазону, використовують у медицині, у тому числі в діагностиці, терапії (для інтенсифікації біохімічних (обмінних) процесів у проблемних частинах тіла пацієнта), хірургії (наприклад, для дроблення каменів у нирках чи жовчному міхурі), стоматології, офтальмології і т. ін. Ультразвук має сильну фізіологічну дію. Завищена потужність (інтенсивність) ультразвукового випромінювання може призвести до пошкодження органів і тканин тіла, і таким чином створюється загроза здоров'ю та навіть життю пацієнта. За недостатньої ж потужності не досягається лікувальний ефект [7]. Тому потужність випромінюваного ультразвуку строго дозується і її потрібно точно вимірювати. Максимально допустима похибка вимірювання не повинна перевищувати $\pm 20\%$ [8], що вважається досить високою точністю для цього виду вимірювання. А результати вимірювань мають бути порівнювані (включно з установленими нормами), визнаватися на національному та міжнародному рівнях і забезпечувати довіру до них [5]. Тобто в країні має бути забезпечена єдність вимірювань потужності ультразвуку і довіра до них. Основним інструментом досягнення такої єдності і довіри на сьогодні (згідно з міжнародними нормативними документами [2, 9–11]) вважається *простежуваність* результатів вимірювань до еталонів системи одиниць SI.

Стан метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку в Україні

В Україні експлуатується великий парк ультразвукової медичної апаратури і кілька типів вимірю-

вачів потужності ультразвуку, зокрема UPM-DT-10 (виробництва США), “ИМУ-Квант” (вітчизняного виробництва), створеного за типом UPM, та вимірювачів потужності “ИМУТАП” і “ИМА-2” (виробництва Росії). Утім, донедавна була повністю відсутня система метрологічного забезпечення ультразвукових вимірювань у водному середовищі, не було еталонів і повірочної схеми [12]. Придатність до застосування вимірювача потужності “ИМУ-Квант”, наприклад, визначалася за відхиленням його показу від значення маси важків, встановлюваних на коромисло мішені. Тобто фактично контролювали лише один (хоча і важливий) компонент вимірювального каналу – електронні лабораторні терези. Надзвичайно складний гідро- і термодинамічний процес випромінювання, розповсюдження і взаємодії пружних ультразвукових хвиль із границями і твердою перешкодою (мішенню) насправді ігнорувався. І отже, не забезпечувалася простежуваність вимірювання до еталонів системи одиниць SI (ват), тобто до опорного значення ключового зв'язу національних еталонів одиниці потужності ультразвуку, що проводять під егідою Міжнародного комітету мір та ваг (BIPM) [13]. Переривався «безперервний» ланцюг калібрувань, утворювався розрив між одиницею потужності (ватом) та одиницею маси (кілограмом).

Вимірювач потужності і частоти ультразвукових випромінювань терапевтичних апаратів портативний “ИМУТАП”, відповідно до його експлуатаційної документації, повірявся за допомогою апаратів УЗ-терапії 1.01Ф та Forte Ultrasound, для контролю вихідних акустичних параметрів яких він і призначений. А це є прямим порушенням основних принципів простежуваності і побудови повірочних схем передавання одиниці вимірювання.

Виробники вимірювачів потужності декларують часом контраверсійні дані щодо їх метрологічних характеристик, що навіть перевищують метрологічні характеристики національних еталонів розвинених країн. Крім того, вимірювач “ИМУТАП” не має метрологічної надійності: у рідині під мембраною виникає повітряний пухирець, який порушує акустичний контакт між ультразвуковим випромінювачем і рідиною і який не можна усунути. Замість дегазованої дистильованої води, рекомендованої міжнародним стандартом [14], використано іншу рідину і її періодичної заміни, згідно з [14], конструкцією не передбачено. Мембрана між випромінювачем і мішенню призводить до значного неконтрольованого згасання ультразвуку. Конструкція погано пристосована для транспортування. У результаті похибка вимірювання може перевищувати максимально допустиму в кілька разів так само, як і у вимірювача потужності ИМА-2. Фактично обидва ці прилади непридатні до застосування, їх не включено до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки.

Тому в ДП “НДІ “Система” було розроблено та введено в дію в 2011 р. вихідний вторинний еталон

одиниці потужності (ват) ультразвуку у водному середовищі (ВЕТУ 10-169-01-11) і локальну повірочну схему передавання одиниці потужності ультразвуку (ЛПУ 10-01-2011) [15, 16].

Введенням у дію еталона ВЕТУ 10-169-01-11 і затвердженої повірочної схеми ЛПУ 10-01-2011 та інших нормативних документів в Україні фактично було створено першу чергу системи метрологічного забезпечення вимірювання основного параметра (потужності) ультразвукового випромінювання в мегагерцовому (так званому “медичному”) діапазоні частот і досягнуто єдності цього виду вимірювань на національному рівні.

Єдність вимірювань, повірка засобів вимірювань і метрологічна простежуваність

На жаль, повірка засобів вимірювань відповідно до повірочної схеми ще не гарантує єдності та визнання результатів вимірювань на міжнародному рівні [17]. Згідно з міжнародними правилами [10, 11], для цього необхідно забезпечити простежуваність результатів вимірювань до еталонів системи одиниць SI.

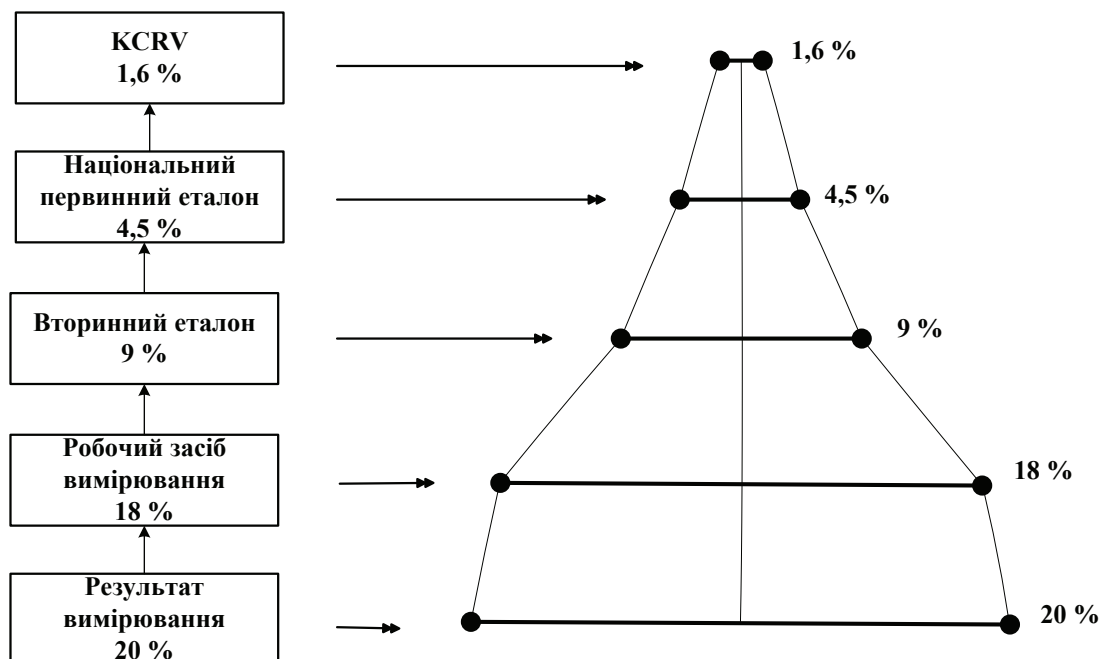
Відповідно до [2] метрологічна простежуваність – це властивість результату вимірювання, відповідно до якої він може бути зв’язаний з основою для порівняння (тобто з дійсним значенням вимірюваної величини, відтворюваної еталоном SI) через *документований безперервний ланцюг калібрувань*, кожне з яких робить свій внесок у невизначеність вимірювання. Метрологічна простежуваність вимагає наявності ієрархії калібрувань, через яку встановлюється ланцюг метрологічної простежуваності – тобто послідовність еталонів і калібрувань, які застосовують для того, щоб пов’язати результат вимірювання з еталоном SI.

Міжнародна організація ІЛАС, крім того, вимагає для підтвердження метрологічної простежу-

ваності наявності документованих методик калібрування та оцінювання невизначеності вимірювання, акредитації лабораторії на технічну компетентність і встановлених інтервалів між калібруваннями [11]. Це дає можливість розраховувати фактичну невизначеність усього ланцюга метрологічної простежуваності за документованою невизначеністю калібрування на кожному етапі та зробити процес отримання результату вимірювання максимально прозорим. Вважається, що тільки таким шляхом досягається надійна єдність вимірювань, за якої результат вимірювання не буде залежати (у межах необхідної точності) від використання іншого засобу чи методу вимірювання, зміни оператора, місця або часу виконання вимірювання та інших компонентів вимірювального процесу і результати вимірювання можна визнавати на міжнародному рівні.

Визначення поняття єдності вимірювань, як це викладено в [17], було сформульовано ще в 60-ті роки минулого століття, досить застаріло, не конкретне і не подає механізмів досягнення поставленої мети. Вимогу, щоб “усі результати вимірювань подавалися в узаконених одиницях” було включено в це визначення з кон’юнктурних міркувань: на той час впровадження міжнародної системи одиниць SI було першочерговим завданням. На сьогодні ця проблема вирішена і втратила актуальність. Друга умова, що “похибки вимірювань не виходять за встановлені межі”, є декларативною та недосяжною, тому що для похибки, як величини випадкової, завжди лишається імовірність виходу її за встановлені межі.

Єдність вимірювань у технічному плані мала б досягатися через повірочні схеми. Але метою повірки, як відомо, є визначення придатності засобу вимірювання до застосування за призначенням, бо необхідно встановити: “придатний” чи “не придатний” [18], і не вимагається досліджувати і до-



кументувати характеристики похибок під час повірки. Все це значно послаблює вимоги до єдності вимірювань і фактично виключає отримання довіри на міжнародному рівні до результатів вимірювань, отриманих за результатами повірки.

Аналіз метрологічної простежуваності та пропозиції щодо подальшого вдосконалення метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку в Україні

Як приклад на рисунку для ілюстрації наведено ланцюг і піраміду невизначеності метрологічної простежуваності результату вимірювання потужності випромінюваного ультразвуку до еталона одиниці SI (ват). Розширену невизначеність опорного значення ключового звірення ($KCRV = 1,6 \%$) та національного первинного еталона ($4,6 \%$) взято за даними останнього ключового звірення ВІРМ ССАUV.U-K3 як середнє значення для всього діапазону частот і потужностей та дев'яти національних еталонів країн-учасниць звірення.

Як видно із рисунка, для того щоб досягти невизначеності вимірювання, яка б не перевищувала максимально допустиму похибку ($MPE = 20 \%$), у країні треба мати національний первинний еталон, оснащений відповідно до зарубіжних аналогів сучасною вимірювальною апаратурою (у першу чергу, високочастотним вольтметром і підсилювачем потужності) і який міг би брати безпосередню участь у ключових звірваннях ВІРМ. Вихідний вторинний еталон, що бере одиницю вимірювання у зарубіжного первинного еталона за допомогою еталона-переносника (шляхом повірки або калібрування під час регіонального звірення), різко втрачає у точності. Не дивлячись на те, що передавання одиниці вимірювання від вторинного еталона робочим засобам вимірювань передбачено прямим методом безпосередньо після калібрування еталонних випромінювачів на вторинному еталоні, необхідної точності і простежуваності вимірювання потужності не можна буде досягти на вторинному еталоні.

Таким чином, для того щоб забезпечити довіру до результатів вимірювання потужності випромінюваного ультразвуку не тільки на національному, але й на міжнародному рівні, необхідно подальше вдосконалення системи метрологічного забезпечення цієї галузі вимірювань в Україні. А для цього необхідно вторинний еталон ВЕТУ 10-169-01-11 перевести в ранг первинного, доукомплектувавши його сучасним підсилювачем потужності та прецизійним високочастотним вольтметром, розробити державну повірочну схему (ланцюг метрологічної простежуваності) та нову нормативну документацію.

Висновки

1. Метрологічна простежуваність результату вимірювання є одним із фундаментальних понять нової парадигми метрології; забезпечення метроло-

гічної простежуваності гарантує довіру до результату вимірювання як на національному, так і на міжнародному рівні.

2. Аналіз показав, що розроблена система метрологічного забезпечення потужності ультразвуку в мегагерцовому ("медичному") діапазоні частот (вихідний еталон України, локальна повірочна схема) забезпечила тільки єдність вимірювань в Україні. Для забезпечення необхідної точності і довіри до результатів вимірювання потужності випромінюваного ультразвуку і на міжнародному рівні необхідно забезпечити простежуваність до міжнародного еталона SI, а для цього необхідно подальше вдосконалення системи метрологічного забезпечення цієї галузі вимірювань в Україні.

3. Вимірювачі потужності "ИМА-2" та "ИМУ-ТАП" не мають достатньої метрологічної надійності і фактично непридатні до застосування.

Для контролю параметрів ультразвукового терапевтичного обладнання можна рекомендувати вимірювачі потужності UPM-DT-10, "ИМУ-Квант" та аналогічні.

Список літератури

1. ISO/IEC Guide 98. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995) (Частина 3: Настанова з подання невизначеності у вимірюванні).
2. International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM). – ISO, 1993.
3. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій): ISO/IEC 17025:2005.
4. Чалий В. Деякі філософсько-інтерпретаційні та прикладні аспекти концепції непевності у вимірюванні / В. Чалий // Метрологія та прилади. – 2011. – № 4. – С. 3–10.
5. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. – Paris, 14 October 1999 (Угода про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами (CIPM MRA)).
6. Колпак Б. Проблеми забезпечення єдності вимірювань акустичних величин в ультразвуковому діапазоні частот / Б. Колпак, В. Чалий, Т. Ільницька // Метрологія та прилади. – 2008. – № 2. – С. 3–9.
7. Еняков А.М. Метрологическое обеспечение ультразвукового медицинского оборудования / А.М. Еняков. – М.: ВНИИФТРИ, 2006. – 160 с.
8. Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz: IEC 61689:2007. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007. – 66 p.

9. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій: ДСТУ ISO/IEC 17025:2006.
10. Прослеживаемость измерений и испытательного оборудования до национальных стандартов: ЕА-4/07М.
11. Политика ILAC по прослеживаемости результатов измерений: ILAC P10:01/2013. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ilac.org/documents/>.
12. Создание в Украине материальной базы метрологического обеспечения измерения мощности ультразвука в мегагерцовом (медицинском) диапазоне частот в водной среде / В.П. Чалый, Т.М. Ильницькая, В.В. Паракуда, И.Г. Кизливский // Метрологія гідроакустических измерений: Всерос. науч.-техн. конф.: материалы. – Менделеево: ФГУП “ВНИИФТРИ”, 2013. – С. 265–272.
13. Koch Christian. Final report on key comparison CCAUV.U-K3 for ultrasonic power / Christian Koch, Klaus-Vitold Jenderka. – [Электронный ресурс] // Metrologia. – 2014. – 51 Tech. Suppl. 09001 – 75 p. – Режим доступа: http://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/AUV/U-K3/CCAUV.U-K3.pdf.
14. Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements: IEC 61161:2006. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006. – 97 p.
15. Чалый В. Створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / В. Чалый, Т. Ильницька // Метрологія та прилади. – 2012. – № 3. – С. 16–25.
16. Метрологія. Локальна повірочна схема для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі: ЛПУ 10-01-2011. – К.: Держспоживстандарт України, 2011.
17. Единство и прослеживаемость измерений. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://metro.ru/HTML/metrology/vvedenie/obespechenie_EI.html.
18. Что означает прослеживаемость? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nreferat.ru/referat/metrologiya-osnovnye-ponyatiya>.

УДК 621.317.4

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.В. Петров, *заместитель директора по научно-техническим вопросам Института технических проблем магнетизма (ИТПМ) НАН Украины, г. Харьков*

А.В. Ерисов, *старший научный сотрудник ИТПМ НАН Украины, г. Харьков*



С.В. Петров



А.В. Ерисов

Введение

При создании малогабаритных космических аппаратов требуется нормирование их собственного магнитного момента, взаимодействие которого с магнитным полем Земли вызывает изменение положения космического аппарата на орбите [1, 2]. Указанное требование вызывает необходимость экспериментального измерения фактических значений магнитных моментов как отдельных образцов аппаратуры, так и космических аппаратов в целом. Такие измерения должны выполняться с максимально возможной точностью [3].

Основная часть

Наиболее распространенные методы определения магнитных моментов основаны на измерении векторов индукции \vec{B}_k магнитного поля в определенных k точках сферической поверхности, внутри которой расположена испытываемая аппаратура, и последующем расчете вектора магнитного момента.

Предложен улучшенный вариант измерительной установки, обеспечивающий повышение точности измерений магнитных моментов аппаратуры космического назначения.

An improved variant of the measuring installation providing the increasing of the measurements accuracy of magnetic moments of the equipment of aerospace purpose is proposed.