

ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

УДК 006.86(045)

Л. О. Кошева, д-р техн. наук, проф.

ВІДТВОРЮВАНІСТЬ – ОСНОВНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТОЧНОСТІ
РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: arnis@ukrpost.net

Показано, що відтворюваність не тільки характеризує точність результатів випробувань, але й є характеристикою, що оцінює реальну спроможність лабораторій виконувати випробування, і за якою можна об'єднувати компетентні лабораторії певної галузі для вироблення спільних рішень як у трактуванні нормативних документів у галузі випробувань, так і у встановленні уніфікованих методик проведення випробувань, а отже, визначати фактичний стан випробувань у галузі.

Ключові слова: відтворюваність, повторюваність, випробувальна лабораторія, точність, технічна компетентність.

Вступ. Історія розвитку технологій випробувань – це рух у бік підвищення достовірності їх результатів. Але тільки останнім часом стало можливо порушити питання про побудову єдиної системи оцінювання якості продукції, про період глобалізації в цій галузі. Глобалізація полягає в тому, що як основу для побудови такої системи застосовують правила, розроблені міжнародними організаціями, такими, як ISO, IEC та ін. Глобалізація зазвичай має позитивні й негативні аспекти: з одного боку, вироблення єдиних правил, процедур, методів випробувань і оцінювання результатів сприяють взаємному визнанню результатів та підвищенню якості продукції, а, з другого боку, діяльність з приведення у відповідність з міжнародними правилами практики випробувань – це фінансово обтяжлива робота, яка у повному обсязі до снаги найбільш розвиненим учасникам ринку випробувань, що підтверджують свою компетентність. Для підтвердження технічної компетенції випробувальних організацій (центрів, лабораторій) проводиться їх акредитація. Під час акредитації перевіряються можливості випробувального центру проводити незалежну та достовірну оцінку якості продукції. Незалежність у цьому випадку означає незалежність випробувального центру від виробника і споживача, або, у термінах ISO, означає, що випробувальний центр може виконувати роль третьої сторони. Як третю сторону залучають кваліфікованих фахівців, основним завданням яких є професійне підтвердження отриманих під час випробувань результатів шляхом перевірки всієї системи організації та проведення випробувань.

З достовірністю результатів пов'язані поняття відтворюваності та правильності [1]. Правильність характеризує правомірність використовуваних методів, достовірність вихідних даних, обґрунтованість припущень, а також відповідність використовуваної процедури випробування методиці їх проведення. Однак належне виконання всіх згаданих вимог зовсім не означає, що результати випробувань, виконані різними лабораторіями, збігаються. Випадкова природа вимірювань, наслідком чого є розсіювання їх результатів, призводить до неоднозначності (невизначеності) результатів процедур, заснованих на вимірюваннях. Тому однієї характеристики – правильності – недостатньо, щоб охарактеризувати точність результату. Для більш повного опису точності результату вводиться ще одна характеристика – відтворюваність, яка характеризує здатність сукупності лабораторій з існуючим рівнем організації та проведення випробувань забезпечувати відтворюваність результатів. Оскільки показники правильності оцінюються на підставі показників прецизійності, то передусім необхідно їх статистично оцінити, зокрема відтворюваність.

На основі відтворюваності можлива побудова системи, за допомогою якої можливе досягнення взаємного визнання результатів випробувань різними лабораторіями. Таке завдання вже оголошено як стратегічне найбільшими лабораторіями світу, наприклад, лабораторіями з

випробування потужного високовольтного обладнання: KEMA (Голандія), CESI (Італія), EDF (Франція), які входять до міжнародної Асоціації випробувальних центрів STL (Short Circuit Testing Liaison) [2].

Основним завданням таких асоціацій є розроблення інструкцій з інтерпретації вимог стандартів у частині випробувань, які допускають неоднозначне тлумачення вимог. Представники всіх випробувальних центрів, що входять до асоціації, виробляють єдиний погляд на спірні вимоги, який потім відображають в інструкції, що стає обов'язковою для застосування в усіх центрах – членах асоціації. Обов'язковість їх застосування усуває потребу в розробленні робочих методик випробувань у кожному випробувальному центрі. Такий підхід сприяє досягненню взаємного визнання результатів випробувань, однаковості в оцінюванні якості продукції.

Постановка проблеми. Для реалізації економічних відносин у конкретних проявах процесу глобалізації необхідні нові підходи до узгодження показників точності результатів випробувань. Такі підходи потрібні як для усунення бар'єрів під час здійснення взаємовідносин у виробничих та невиробничих сферах, пов'язаних з різними оцінками показників точності випробувань у постачальників і споживачів, так і для акредитації випробувальних лабораторій, підтвердження відповідності продукції, атестації методик випробувань тощо. Сучасні тенденції щодо встановлення та оцінювання характеристик точності результатів випробувань полягають у відході від ідеології призначення їх допустимих значень та від ідеології приймання розробленої методики на підставі вимірювань організації-розробника, а потребують нових підходів до їх нормування на основі статистичних методів.

Основний матеріал. У нормативних документах [3; 4] наводиться означення похибки випробувань як різниці між результатом випробувань характеристики об'єкта у фактичних умовах випробувань та істинним (дійсним) значенням характеристики об'єкта в умовах випробувань, установлених у нормативному документі до методів випробувань об'єкта:

$$D_x = x - m, \quad (1)$$

де x – результат випробування; m – дійсне значення параметра продукції, що піддається випробуванням (в оригіналі документа [4]).

Однак у прикладах, наведених у додатках до цього документа, розраховується не похибка за рекомендованою у стандарті [4] формулою (1), а інша характеристика точності результату випробувань – відтворюваність. Очевидно, це пов'язано зі складністю знаходження дійсного значення характеристики об'єкта в умовах випробувань, установлених у нормативному документі до методів випробувань об'єкта відповідно до визначення похибки результату випробувань [4].

Дійсно, стан об'єкта випробувань характеризується деяким вектором Y , що є функціоналом умов випробувань (параметрів режимів роботи об'єкта й зовнішніх умов):

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (2)$$

Якщо зміни стану об'єкта оцінюються за кількісними результатами, то поряд з точністю вимірювання (завдання) умов випробувань постає вимірювальна задача з оцінювання значень параметра вихідної величини об'єкта. У цьому разі суттєвим є правильне уявлення про вектор стану об'єкта Y з огляду на те, що в більшості випадків вид взаємозв'язку умов випробувань з параметрами вимірюваної величини об'єкта невідомий, тобто невідома точна функціональна залежність (2). Стан об'єкта оцінюють не за відхиленням вектора його стану Y , а за значеннями інформативних параметрів його вихідної величини та їх відхилень. Відповідно до фізики процесу вимірювань ці параметри є ортогональними складовими (проекціями) вектора стану. Однак за наявності взаємозв'язку складових подання вектора стану об'єкта у вигляді незалежних ортогональних складових не адекватно відображає його дійсний стан. Оскільки неможливо

врахувати вплив взаємозв'язку можливих значень параметрів умов випробувань під час вимірювання інформативних параметрів вихідного сигналу, виникає додаткова методична невизначеність результату випробувань.

Випробувати один і той самий об'єкт за однією методикою можуть різні лабораторії в різних умовах. Їх устаткування має різні (індивідуальні) технічні характеристики, а досліді проводять за участю різних операторів та в різний час. Результати, отримані у такий спосіб, тобто за умов відтворюваності, можуть дещо розрізнятися. Цій властивості повторних випробувань відповідає особлива характеристика – відтворюваність результатів випробувань – прецизійність в умовах відтворюваності (у кожній лабораторії має виконуватися умова повторюваності).

Як показник відтворюваності використовують стандартне відхилення σ_R результатів випробувань, отриманих в умовах відтворюваності, за регламентованою методикою випробування та стабільними характеристиками об'єкта.

На точність отриманих у лабораторії результатів суттєво впливає організація випробувального процесу в конкретній лабораторії, що можна оцінити за лабораторною похибкою – різницею між очікуваним результатом випробувань, отриманим у лабораторії, й опорним значенням [1].

Лабораторна похибка містить у собі систематичну й випадкову складові. Випадкова складова e° проявляється в розкиді результатів спостережень навколо деякого середнього за фіксованих факторів впливу. Причиною цього розкиду є вплив неврахованих факторів, про існування яких або характер впливу яких не відомо. Такий розкид результатів в окремій лабораторії в умовах повторюваності характеризує дисперсія в межах лабораторії:

$$\text{Var}(e^\circ) = \sigma_w^2.$$

Можна очікувати, що лабораторні дисперсії будуть різними для різних лабораторій. Однак для стандартизованої методики випробувань у разі дотримання кожною лабораторією умов повторюваності такі розбіжності між лабораторіями будуть невеликими. Тому загальне середнє значення дисперсій результатів у лабораторіях, що беруть участь у спільному експерименті в умовах повторюваності, може стати надійною характеристикою випадкової похибки вимірювання й надалі бути нормованою для стандартизованої методики. Це загальне значення, що визначається як середнє арифметичне внутрішньолабораторних дисперсій σ_w^2 , є дисперсією повторюваності:

$$\sigma_r^2 = \overline{\text{Var}(e^\circ)} = \overline{\sigma_w^2}.$$

Результати випробувань, отримані двома лабораторіями за однією й тією самою методикою, будуть розрізнятися навіть для однакового випробуваного зразка. Це зумовлено тим, що в лабораторіях експерименти проводять різні оператори на різному устаткуванні і, хоча й вважається, що вони одного класу, але оператори за кваліфікацією і устаткування за характеристиками (хоча вони перебувають у межах допустимих або заданих норм) будуть відрізнятися. Така можлива відмінність між лабораторним устаткуванням і операторами призводить до того, що будуть відрізнятися й лабораторні складові зміщення результату B , можливі значення яких характеризуються міжлабораторною дисперсією:

$$\text{Var}(B) = \sigma_L^2,$$

де σ_L^2 зумовлено впливом можливого збігу розходжень між операторами, устаткуванням та організацією проведення випробувань у лабораторіях.

Оскільки лабораторна похибка містить систематичну й випадкову складові, а постійна складова лабораторного зміщення B є вибіркоким значенням випадкової величини

«міжлабораторні зміни», то для характеристики дисперсії відтворюваності між результатами, отримуваними різними лабораторіями σ_R^2 , необхідно розглядати сумарний вплив як дисперсії повторюваності, так і міжлабораторної дисперсії:

$$\sigma_R^2 = \sigma_L^2 + \sigma_r^2.$$

Значення дисперсії відтворюваності, отримане для стандартизованої методики випробувань, буде статистично значущим лише за достатньої кількості спостережень у лабораторії та кількості лабораторій, що брали участь у спільному експерименті, який проводився для визначення характеристики цієї методики. На достатності статистичних показників [5] сформовано ідеологію оцінювання точності результатів випробувань і визначаються основні вимоги до експериментів, що дають змогу забезпечити такі оцінки. Зрештою оцінювання дисперсій стає точним і дозволяє установлювати бажані рівні якості вимірювань, удосконалювати методики випробувань продукції й атестації лабораторій, порівнювати різні методики випробувань тощо. При цьому найбільш ефективним є проведення міжлабораторних експериментів [6].

Програмою міжлабораторного експерименту передбачається, що певна кількість лабораторій виконує повторні вимірювання на одному й тому самому зразку матеріалу одним і тим самим методом. Якщо зразок випробовувався один раз у різних лабораторіях, то дисперсія отриманих значень характеристики Y відобразить деяку комбінацію мінливості, яка є результатом внутрішньолабораторної й міжлабораторної мінливості, що описується певною статистичною моделлю. При цьому кожний результат $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ виражається через окремі складові похибки, що враховують принципи організації випробувань у лабораторії, наявність еталонної величини, досконалість застосовуваної методики, а також немінучий вплив випадкових величин, властивий кожній експериментальній процедурі.

Отже, суттєвим для оцінювання дисперсій є визначення мінімально необхідної кількості лабораторій p , залучених до експерименту, та спостережень n , виконаних ними. Якщо варіація оцінки дисперсії $V(s^2)$ залежить від n , можна визначати кількість спостережень, необхідних для знаходження надійних (спроможних) оцінок дисперсії, тобто таких оцінок s^2 , для яких дисперсія $V(s^2)$ буде досить малою.

Будемо виходити з того, що для нормованої й центрованої величини довірчий інтервал зміни нормованого вибіркового стандартного відхилення s , що охоплює 95 % його значень (середина діапазону збігається із центром симетрії диференціального розподілу випадкової величини s) визначається відповідно до співвідношення

$$P[-A < (s - \sigma) / \sigma < +A] = 0,95.$$

Оцінюючи половину довірчого інтервалу, що характеризує точність оцінювання стандартного відхилення під час виконання випробувань в умовах відтворюваності A_R , необхідно враховувати дисперсію повторюваності та міжлабораторну дисперсію. З урахуванням цього

$$A_R = 1,96 \sqrt{\left\{ p \left[1 + n(\gamma^2 - 1) \right]^2 + (n-1)(p-1) \right\} / \left[2\gamma^4 n^2 (p-1) p \right]}, \quad (3)$$

де $\gamma = \sigma_R / \sigma_r$.

Значення γ зазвичай невідоме, але можна отримати попередні оцінки внутрішньолабораторних та міжлабораторних стандартних відхилень у процесі стандартизації методики випробувань.

Вираз (3) характеризує розсіювання оцінок стандартних відхилень і залежить від достатності вимірювального експерименту. Використовуючи цей вираз, можна визначати потрібну кількість лабораторій p та виконаних ними спостережень n для забезпечення необхідної відтворюваності та отримання надійного результату.

Відтворюваність є базовою характеристикою для встановлення невизначеності результатів лабораторних випробувань. Можна показати наявність зв'язку між відтворюваністю та невизначеністю результату [7]. Так, аналітичні вирази, використовувані для оцінювання невизначеності та відтворюваності, аналогічні, а формули, за якими в праці [8] виконано розрахунок сумарної стандартної невизначеності, що характеризує невизначеність оцінки вимірюваної величини, збігаються з відповідними формулами, отримуваними в результаті оцінювання (у тих же умовах) відтворюваності вимірюваної величини. Для будь-якої диференційованої функції $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, що являє собою залежність вимірюваних значень випадкової величини $y = y_0 + \Delta y$ від значень вхідних випадкових величин $x_{i0} + \Delta x_{ij}$, розкладання в ряд Тейлора в лінійному наближенні має вигляд

$$\begin{aligned} y_0 + \Delta y &= f(x_{10} + \Delta x_1, x_{20} + \Delta x_2, x_{N0} + \Delta x_N) = \\ &= f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{N0}) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right) \Delta x_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right) \Delta x_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N} \right) \Delta x_N, \end{aligned} \quad (4)$$

де $y_0, x_{i0}, (i = \overline{1, N})$ – середні значення (математичні сподівання) відповідних величин.

Якщо середні значення випадкових величин $x_{i0} = M(x_i)$, то

$$y_0 = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{N0}) = M(y),$$

дисперсія випадкової величини y залежить від інших складових у правій частині виразу (4) і дорівнює

$$M(\Delta y^2) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 M(\Delta x_i^2) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) M(\Delta x_i \Delta x_j). \quad (5)$$

Якщо вираз (5) подати позначеннями, використовуваними у праці [8], тобто $M(\Delta x_i^2) = u^2(x_i)$; $M(\Delta y^2) = u_c^2(y)$; $M(\Delta x_i \Delta x_j) = u(x_i, x_j)$, то права частина рівності (5) збігається із правою частиною виразу для сумарної стандартної невизначеності [8]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} \right) u(x_i, x_j)}.$$

А якщо збігаються праві частини, то збігаються й ліві, тобто дисперсія, що характеризує відтворюваність результатів під час випробувань є дисперсією сумарної невизначеності, яка у праці [8] оцінюється за результатами опосередкованих вимірювань на підставі модельного рівняння.

Висновки. Отже, відтворюваність є інтегральною характеристикою випробувань, яка включає в себе повторюваність результатів, вплив факторів, що не мають кількісного вираження, похибку формування умов та режиму роботи об'єкта, і дозволяє без використання модельного рівняння, що описує процедуру випробувань, оцінювати невизначеність отримуваних результатів та фактори впливу без суб'єктивного встановлення їх причинно-наслідкового зв'язку.

Відтворюваність є або характеристикою сумісності лабораторій, що займаються випробуваннями тієї самої продукції (у тому числі й у різних країнах), або характеристикою досконалості або недосконалості тієї або іншої методики випробувань в умовах, коли випробування виконують різні лабораторії, тобто формалізує становище випробувального процесу у певній галузі. За дисперсією відтворюваності лабораторії залучаються до об'єднання компетентних лабораторій, визначаючи пороги як прийому до неї, так і виключення лабораторій, тобто відтворюваність характеризує здатність лабораторій злагоджено виконувати випробування

відповідно до методики. Надалі будь-які висновки про прийнятність та відповідність під час порівняння не тільки лабораторій, але й методик за показниками правильності й прецизійності можна отримати лише за відомого значення відтворюваності. Порівняння має ґрунтуватися не на виявленні різниці між двома дисперсіями або між двома середніми значеннями, а на застосуванні критеріїв значущості, що використовують поняття належності результатів випробувань до однієї або різних множин.

У такий спосіб дисперсія відтворюваності є основою порівняльності та підтвердження відповідності лабораторних результатів атестації, стандартизації та валідації методик випробувань, а також поряд із правильністю, важливою характеристикою для акредитації випробувальних лабораторій.

Список літератури

1. *Точність* (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Ч. 1. Основні положення та визначення: (ISO/IEC 5725-1:1994, IDT): ДСТУ ГОСТ ISO 5725-1:2005. – [Чинний від 2006-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 31 с. – (Національний стандарт України).
2. *Електронний ресурс* <http://www.niiva.org/data/pdf>.
3. *Рекомендация*. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров: МИ 1317–2004. ГСИ. – [Введ. с 2005.01.01]. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 29 с.
4. *Метрологическое* обеспечение испытаний продукции для целей подтверждения соответствия: ГОСТ Р 51672:2000. – [Введ. с 2001-07-01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов. – 2001. – 28 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
5. *Настанови* щодо застосування статистичних методів згідно з ISO 9001:2000 (ISO/TR 10017:2003, IDT): ДСТУ ISO/TR 10017:2005. – [Чинний від 2006.01.01]. – 48 с. – (Національний стандарт України).
6. *Настанови*. Проверка професійного рівня шляхом міжлабораторних порівняльних випробувань: ISO/IEC 43:1997. – [1997-08-08]. – Geneva, 1997. – 37 р.
7. *Кошечая Л. А.* Обеспечение единства испытаний. Концептуальные основы: монография / Л. А. Кошечая. – К.: НАУ-друк, 2009. – 176 с.
8. *Руководство* по выражению неопределенности измерения [пер. с англ.]; под. ред. В. А. Слаева. – СПб.: ГП ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. – 126 с.

Л. А. Кошечая

Воспроизводимость – основная характеристика точности результатов испытаний

Показано, что воспроизводимость не только характеризует точность результатов испытаний, но и является характеристикой, оценивающей реальную способность лабораторий выполнять испытания, и по которой можно объединять компетентные лаборатории в определенной области для выработки совместных решений как в трактовке нормативных документов в области испытаний, так и в установлении унифицированных методик проведения испытаний, а следовательно, определять фактическое состояние испытаний в отрасли.

L. O. Kosheva

Reproducibility – main characteristics of accuracy test results

It is shown that the reproducibility of not only characterizes the accuracy of test results, but is a characteristic that evaluates the real ability of laboratories to perform tests, characteristics that can be combined in the laboratory competent in certain sphere to develop joint solutions as in the interpretation of regulations in the field trials and to establish uniform procedures for test, and, consequently, to determine the actual state tests in the industry.