

П.О. Жикол, Д.І. Чусь, Р.Б. Белінська

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДІВ ДЕФЕКТОСКОПІЧНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Основними показниками ефективності дефектоскопічного контролю елементів конструкції літального апарата є надійність та достовірність результатів контролю, які підлягають метрологічному контролю.

У статті на основі аналізу функціональних можливостей методів дефектоскопічного контролю встановлено, що в процесі дефектування елементів конструкції літального апарата реалізуються різні технології визначення факту наявності дефекту, які обумовлюють різні підходи до оцінювання достовірності результатів контролю.

На основі аналізу методів оцінювання достовірності результатів вимірювань у метрології та проведених досліджень запропоновано методичні підходи до кількісного оцінювання показників достовірності методів дефектоскопічного контролю, які базуються на емпіричному визначенні статистичних оцінок параметрів дефектів робочих еталонів та атестованих зразків дефектних деталей.

Ключові слова: літальний апарат, елемент конструкції, дефект, виявлення, діагностування, дефектоскопічний контроль, ймовірність, середньоквадратичне відхилення, точність, похибка вимірювань, достовірність, робочі еталони, вірогідність контролю.

Вступ

Постановка проблеми. Метою неруйнівного контролю (НК) елементів конструкції літальних апаратів (ЛА) в процесі технічного обслуговування є виявлення наявних експлуатаційних дефектів і пошкоджень [1, с. 78; 2, с. 12, 13].

Різноманіття дефектів несучильності матеріалу й зміни його фізико-механічних властивостей, широкий набір конструкційних матеріалів, габаритних розмірів і форм контрольованих вузлів і деталей та факт суттєвого зростання кількості небезпечних несправностей наявного парку ЛА в останні роки обумовлюють застосування для виявлення дефектів на елементах конструкції ЛА широкого переліку спеціалізованих методів і засобів НК, зокрема – візуально-оптичного, капілярного, магнітопорошкового, вихрострумового, акустичного імпедансного, ультразвукового та радіографічного контролю [1, с. 27...38; 3, с. 3...10].

У зв'язку зі складністю технологічного процесу, перелічені методи й засоби НК не орієнтовані на контроль зміни фізико-механічних властивостей матеріалу елементів конструкції ЛА та кількісного оцінювання його залишкової міцності. На даний час у процесі технічного обслуговування вони виявляють лише наявні дефекти [1, с. 54; 4, с. 7]. Тому в подальшому в статті розглядається тільки питання

дефектоскопічного контролю елементів конструкції як найбільш поширеного в процесі технічного обслуговування й ремонту ЛА.

Оцінюється ефективність дефектоскопічного контролю рядом показників, основними [1, с. 86] з яких є:

надійність (ймовірність) виявлення дефектів;

достовірність результатів контролю;

термін проведення контролю й затрати на нього;

відсутність негативного впливу контролю на експлуатаційні властивості деталей тощо.

Як видно з переліку, показники надійності виявлення дефектів та достовірності отримуваних результатів контролю є важливішими в системі оцінки ефективності методів дефектоскопічного контролю.

Дефектоскопічний контроль елементів конструкції ЛА регламентується нормативно-методичними документами, які на кожний елемент конструкції встановлюють вимоги щодо рекомендованих методів і засобів контролю, кваліфікації персоналу, зони контролю і типів шуканих дефектів, умов проведення і послідовності операцій контролю, переліку і допустимих значень параметрів контролю та критеріїв оцінки стану об'єкта за результатами НК. Ці вимоги не підлягають частим змінам [1, с. 64...69; 3, с. 3...6].

Рекомендовані в методичних документах методи й засоби дефектоскопічного контролю

технічного стану елементів конструкції ЛА в процесі експлуатації підлягають обов'язковому метрологічному контролю з метою "1. Забезпечення єдності, точності вимірювань і достовірності контролю" [5, с. 19]. Відповідно, для проведення метрологічного контролю повинні розроблятися і технічні регламенти щодо кількісної оцінки показників надійності виявлення дефектів та достовірності результатів контролю [22, с. 9...12].

У практичній діяльності кількісні оцінки показників достовірності методів дефектоскопічного контролю необхідні також і при виборі ефективного методу НК для виявлення дефектів елементів конструкції складної форми, коли фахівець-дефектоскопіст змушений самостійно вибирати кращий, на його думку, з наявних методів і засобів НК, а також при налаштуванні обладнання НК, а саме – налаштуванні його чутливості й роздільної здатності, які забезпечують необхідну ефективність виявлення дефектів [1, с. 164...173; 4, с. 6].

Питання метрологічної експертизи показників надійності виявлення дефектів та достовірності результатів контролю є методично слабо опрацьованими [1, с. 211; 3, с. 8; 5, с. 20]. Метрологічний контроль у процесі технічного обслуговування ЛА включає тільки контроль функціонування діагностичних приладів та контроль за застосуванням методик вимірювань при проведенні НК, які базуються на використанні робочих еталонів, атестованих зразків дефектних деталей з дефектами відомих розмірів та стандартних засобів вимірювання [5, с. 19...22; 12, с. 231].

У наукових роботах розглядаються теоретичні аспекти проблеми оцінювання достовірності результатів контролю засобами НК на великих виробках машинобудування складної геометричної форми, в результаті яких, на основі застосування теорії ймовірності та залежностей з критичними інтегралами, одержані результати в загальному вигляді. Однак застосування розроблених теоретичних моделей до конкретних виробів мають серйозні методологічні складності [6, с. 143...146; 7, с. 96...101].

Проблематичність питання розробки прикладних методів оцінювання достовірності результатів контролю обумовлена, в тому числі, й нечіткістю трактування терміну достовірності контролю. Так, в нормативно-методичних документах і публікаціях достовірність результатів НК трактується: як показник ступеня об'єктивного відображення результатами контролю дійсного технічного стану виробу [9], як ступінь об'єктивної відповідності результатів контролю дійсному технічному стану об'єкта [10], як точність, що включає вірогідність та збіжність результатів

контролю випробувань [11], як прецизійність і правильність результатів контролю випробувань [8, с. 120...123], як показник неруйнівного контролю (кількісний або якісний), пов'язаний з ймовірностями прийняття безпомилкових рішень про наявність чи відсутність дефектів [12, с. 39; 13, с. 134], як вірогідність контролю, оцінкою якої є ймовірність того, що результат контролю відповідає дійсному стану об'єкта, а її кількісне значення знаходиться в межах від 0 до 1 [7, с. 164] та як показник неруйнівного контролю (кількісний або якісний), пов'язаний з вірогідністю прийняття безпомилкових рішень про наявність чи відсутність дефектів [13, с. 43].

У наведених поняттях під достовірністю результатів контролю розуміється прийняття безпомилкових рішень щодо наявності чи відсутності дефектів за значеннями контрольованих параметрів, але однозначно не визначено її одиницю вимірювання й методики кількісного обчислення. Як зазначено фахівцями Вікіпедії "Вимірювання в техніці є особливою науковою дисципліною з системою понять і методами аналізу, процес формування якої, як єдиної наукової дисципліни, ще не закінчений".

Питання кількісного оцінювання метрологічних характеристик методів дефектоскопічного контролю, які застосовуються для виявлення дефектів на елементах конструкції ЛА, потребує подальшого опрацювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Систематизовані дослідження щодо оцінювання достовірності методів і результатів неруйнівного контролю обмежені, що обумовлено складністю впровадження розроблених теоретичних моделей оцінювання у практичну сферу застосування засобів неруйнівного контролю для діагностування складних виробів [6, с. 141].

У різних сферах практичної діяльності більш широке застосування знаходять методи оцінювання результатів на базі вимірювального контролю, які обробляють результат вимірювань у вигляді набору значень контрольованого параметра. Оцінювання достовірності результатів таких вимірювань проводиться за різними методиками і їх результати широко представлені в публікаціях [6...8, 14...18].

Зокрема, в роботі [18, с. 53] як оцінку вірогідності D виявлення дефекту заданого розміру методом НК пропонується використовувати середнє арифметичне значенням вимірюваного параметра $\bar{X}$, визначене по обмеженій кількості вимірювань ($n < 20$) та скориговане на ширину довірчого інтервалу Δx , що обумовлює низьку достовірність оцінки і недопустимість систематичних похибок вимірювань при проведенні контролю.

Аналогічний алгоритм оцінювання результатів досліджень щодо визначення поточного навантаження в елементах будівельних металлоконструкцій з використанням ультразвукового контролю розглядається в роботі [14, с. 41]. Як оцінка достовірності результатів досліджень V використовується статистична оцінка середнього значення параметра $\bar{X}$, отримана на обмеженому ряді вимірювань ($n < 50$), і скоригована на величину стандартного відхилення.

При оцінюванні достовірності результатів досліджень щодо наявності металів у кернових пробах, отриманих при бурінні надр, її значення V оцінюють величиною систематичної похибки вимірювань у пробі, вираженої у відсотках [15, с. 53].

У процесі контролю структурних перетворень некристалічних напівпровідників як інструментальна оцінка вірогідності D результату контролю температури фазового перетворення матеріалу використовуються помилки першого і другого роду щодо відповідності чи не відповідності допустимим межах значення термодинамічного процесу. Значення помилок першого і другого роду визначаються за параметрами статистичних оцінок температури плавлення контрольованого матеріалу та похибки її вимірювання, отриманих за результатами обмеженого ряду експериментальних вимірювань температури [17, с. 46].

При оцінюванні ефективності системи збору інформації про трофейні озброєння вірогідність D отриманої інформації про трофейні зразки визначається як відношення достовірної ($V_{correct}$) інформації (точно зареєстровані дані про захоплені зразки озброєння) до недостовірної (V_{false}) інформації (кількість зразків озброєння, не відображених в донесеннях, але є відомості про її можливу наявність). Тобто $D = V_{correct} / V_{false}$ [16, с. 23].

У практичній діяльності проведення контролю мають місце випадки, коли відома інформація про вид розподілу контрольованого параметра і похибки вимірювань. У цьому випадку оцінювати достовірність D методу вимірювального контролю пропонується з використанням помилки першого і другого роду за формулою: $D = 1 - (P_\alpha + P_\beta)$. Помилки першого і другого роду визначаються через щільність розподілу контрольованого параметра та випадкової похибки вимірювання [7, с. 96...101].

У роботі [8, с. 112...124] достовірність результатів вимірювань при проведенні випробувань пропонується оцінювати ймовірністю помилок першого і другого роду, а точність результатів вимірювань – показниками повторюваності й відтворюваності результатів вимірювань з урахуванням похибки методу й похибки вимірювань.

Цілеспрямовані дослідження щодо оцінювання достовірності результатів використання методів НК при виявленні дефектів (зокрема, при використанні ультразвукового контролю з'єднань товстостінних конструкцій) проведено на об'єктах атомної енергетики. При дослідженнях використано ймовірнісний підхід до оцінювання достовірності виявлення дефектів, значення ймовірностей виражається у відсотках [6, с. 141].

Таким чином, проведений аналіз нормативно-методичних документів та публікацій з питань неруйнівного контролю й метрології засвідчує велике різноманіття змісту терміну достовірності результатів контролю та множину методів кількісного оцінювання результатів вимірювального контролю, але унормоване тлумачення зазначених термінів немає.

Тому в ході подальших досліджень як показники надійності виявлення дефектів прийнято ймовірності (виявлення, пропуску) дефектів, показники достовірності результатів контролю – похибка (вимірювань, оцінювань) та вірогідність результатів контролю [2, с. 12...17; 9, с. 5].

Мета статті – розроблення методичного підходу щодо кількісного оцінювання показників достовірності методів дефектоскопічного контролю елементів конструкції ЛА.

Виклад основного матеріалу

Фізично процес дефектоскопічного контролю представляється послідовністю етапів – етап виявлення за допомогою приладу місця можливого дефекту на елементі конструкції, етап вимірювання характеристик і параметрів дефекту та етап оцінювання впливу дефекту на технічний стан елемента конструкції [19, с. 4]. Тобто процес виявлення дефекту є початковим і визначальним етапом дефектоскопічного контролю.

Остаточне рішення про наявність чи відсутність дефекту на об'єкті контролю в процесі дефектоскопічного контролю приймає фахівець за показаннями дефектоскопа. Відповідно, рівень надійності й достовірності результату залежить як від показань дефектоскопа, так і від суб'єктивного досвіду фахівця й обумовлюється використаними методами НК, технічними характеристиками дефектоскопа, рівнем підготовки фахівця, дефектоскопічною технологічністю елементів конструкції ЛА, розміром і місцем розташування дефекту на елементах конструкції, способами відображення й реєстрації результатів пошуку та іншими факторами, які сукупно обумовлюють певний рівень невизначеності результатів контролю.

У процесі дефектоскопічного контролю елементів конструкції ЛА застосовуються різні

спеціалізовані методи НК, частина з яких реалізує технологію вимірювального контролю (товщиноміри, вібродіагностичні прилади, тощо), при якій результат контролю представляється набором значень контрольованого параметра елемента конструкції, а наявність дефекту визначається шляхом його аналізу і оцінювання. Інші методи НК факт наявності дефекту представляють у формі кінцевого рішення (вихрострумові та ультразвукові дефектоскопи, прилади імпедансного контролю, тощо).

Різні технології виявлення методами НК наявності дефекту обумовлюють і різні методичні підходи до оцінювання показників достовірності – похибки вимірювань та вірогідності результатів контролю. Розглянемо їх.

Головною характеристикою якості вимірювання при вимірювальному контролі є точність, яка відображає близькість результату вимірювань x_i до істинного значення вимірюваної величини x . Показником оцінювання точності є величина похибки вимірювання Δx , граничне значення якої $|x - x_i| < \Delta x$, приймається як оцінка точності вимірювання.

Залежно від розміру похибки Δx і його співвідношення з межами встановленого допуску на контрольований параметр, системою контролю приймаються такі варіанти оцінок результату вимірювання: якщо значення вимірюваного параметра x_i знаходиться в межах встановленого допуску і приладом (методом) вимірювання визначається допустимим, то результат контролю оцінюється ймовірністю виявлення відсутності дефекту P_w ; якщо значення параметра вийшло за межі допуску і приладом вимірювання визначається як недопустиме, то результат контролю оцінюється ймовірністю виявлення дефекту P_v ; якщо значення вимірюваного параметра знаходиться в межах встановленого допуску, але приладом вимірювання визначається як недопустимий, то результат контролю оцінюється ймовірністю помилкового виявлення дефекту P_p ; якщо значення параметра вийшло за межі допуску, але приладом вимірювання визначається як допустиме, то результат контролю оцінюється ймовірністю пропуску дефектів P_a .

Аналітичне визначення указаних імовірнісних показників контролю за результатами вимірювань можливе при наявності достовірної інформації щодо виду функції розподілу ймовірностей $F(x)$ (або їх густини $f(x)$ розподілу) контрольованих параметрів та похибки вимірювань, а також даних щодо меж похибки вимірювань.

Відомі підходи до дослідження характеристик технічних систем і отримання статистичної

інформації для оцінювання імовірнісних показників [20, с. 64...85]:

шляхом математичного моделювання процесу функціонування технічних систем;

шляхом накопичення статистичних даних у процесі виконання робіт з технічного обслуговування;

шляхом спеціальних натурних і лабораторних випробувань.

Складність математично-модельного підходу до визначення статистичних даних для конкретно визначених умов проведення вимірювань й урахування специфіки засобу НК та великі обсяги вимірювань і термін накопичення даних в ході реальних досліджень ЛА обмежують застосування таких підходів для визначення указаних імовірнісних показників.

Ефективним щодо визначення характеристик методів НК є підхід, заснований на прискорено-експериментальних дослідженнях і випробуваннях з використанням дослідних або стандартних та контрольних зразків [21, с. 28...35]. Необхідною умовою проведення таких досліджень є попередній аналіз експлуатаційних режимів використання контрольованих елементів конструкції ЛА і визначення найбільш інтенсивно виникаючих дефектів з метою їх відтворення в ході досліджень. Методи лабораторного та прискорено-експериментального метрологічного оцінювання ефективності результатів застосування засобів НК з використанням стандартних та контрольних деталей зі штучними дефектами отримали значне поширення у технологічно-провідних країнах [7, с. 158...160].

За відсутності достовірної інформації щодо розподілу ймовірностей $F(x)$ чи густини $f(x)$, скористаємося емпіричним підходом до визначення імовірнісних показників контролю, а в кінцевому результаті – похибки вимірювань Δx і вірогідності D , на обмеженій вибірці n результатів вимірювань x_i , проведених за атестованими методиками. Як джерелами відповідних дефектів скористаємось наборами робочих еталонів та атестованих зразків дефектних деталей системи експлуатаційного метрологічного контролю засобів НК [1, с. 196...202; 5, с. 19...21].

Суть підходу полягає у проведенні n незалежних вимірювань і реєстрації значень оцінюваного параметра $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ в точці ймовірного знаходження дефекту на зразку дефектної деталі, при незмінному положенні датчика відносно її поверхні. Для формування сукупностей результатів вимірювань аналогічні точкові вимірювання проводяться шляхом переміщення датчика приладу НК по робочій ділянці деталі за довільною траєкторією. Аналіз

накопичених результатів вимірювань для визначення оцінок проводиться у такій послідовності [23, с. 13; 28, с. 14, 15].

За сукупністю n значень результатів експериментальних вимірювань x_i , які включають випадкові похибки вимірювань Δ_i (похибка Δ_i може включати систематичну, методичну, випадкову похибку та інші, але для спрощення розрахунків у статті розглядається тільки вплив найбільш небезпечної – випадкової похибки) визначається середнє арифметичне значення $\bar{x}$ результатів вимірювань в одній точці:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

та їх середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

де: $(n - 1)$ – число ступенів свободи.

Значення σ характеризує розсіювання результатів n вимірювань в одній точці контролю. Середньоквадратичне відхилення сукупності середніх арифметичних $\bar{x}_j$ (j – порядковий номер точки контролю) обчислюється за формулою:

$$\bar{\sigma}(\bar{x}_j) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

з якої видно, що збільшення числа вимірювань (в точці) веде до зниження випадкової похибки. При обмеженому обсязі вимірювань ($n \leq 20$) значення середньоквадратичного відхилення $\bar{\sigma}(\bar{x}_j)$ може бути прийнято як орієнтовна оцінка абсолютної величини похибки $|x - \bar{x}| < \Delta x$ [24, с. 145...149].

За обчисленим значенням середньоквадратичного відхилення $\bar{\sigma}(\bar{x}_j)$ за формулою Ст'юдента визначається параметр $\Delta \bar{x}$ довірчого інтервалу випадкової похибки: $\Delta \bar{x} = \pm k_t \bar{\sigma}(\bar{x}_j)$, де k_t – коефіцієнт розподілу Ст'юдента, величина якого вибирається за таблицею ймовірностей, залежно від числа проведених вимірювань n і вибраної довірчої ймовірності P (для практичних цілей – на рівні 0,95...0,98) [25, с. 110...112; 28, с. 19].

За розрахованим значенням параметра довірчого інтервалу $\Delta \bar{x}$ визначаємо верхню $x_v = \bar{x} + \Delta \bar{x}$ та нижню $x_n = \bar{x} - \Delta \bar{x}$ довірчі границі контрольованого параметра x , та його значення у вигляді: $x = \bar{x} \pm \Delta \bar{x}$ [24, с. 145].

Величина похибки вимірювань $\Delta \bar{x}$ характеризує випадкове розсіювання оцінок результатів вимірювань і входить в оцінку сумарної вірогідності контролю за допомогою операції згортки закону розподілу контрольованого параметра $f(x)$ і закону розподілу випадкової похибки $\varphi(\Delta)$ [7, с. 164...166]. Існує однозначна залежність між характеристиками похибки вимірювань і характеристиками вірогідності

результатів контролю.

Зокрема, ймовірність помилкового виявлення дефекту P_β обчислюється шляхом згортки закону розподілу значень контрольованого параметра $f(x)$ і закону розподілу випадкової похибки $\varphi(\Delta)$ у вигляді [7, с. 176...181]:

$$P_\beta = \int_{x_n}^{x_v} f(x) \int_{-\infty}^{x_n - x} \varphi(\Delta) d\Delta dx + \int_{x_v}^{x_b} f(x) \int_{x_v - x}^{+\infty} \varphi(\Delta) d\Delta dx. \quad (4)$$

Аналогічно, ймовірність пропуску дефектів P_α обчислюється за виразом виду:

$$P_\alpha = \int_{-\infty}^{x_n} f(x) \int_{x_n - x}^{x_v - x} \varphi(\Delta) d\Delta dx + \int_{x_v}^{+\infty} f(x) \int_{x_n - x}^{x_v - x} \varphi(\Delta) d\Delta dx. \quad (5)$$

У вирази (4, 5) у загальному виді входить щільність розподілу контрольованого параметра $f(x)$ та випадкової похибки $\varphi(\Delta)$, що вказує на суттєву залежність значення показників P_α і P_β від виду їх розподілу. Тому лише обґрунтоване визначення виду розподілу указаних функцій дасть змогу отримати достовірну оцінку ймовірнісних показників виявлення дефекту та вірогідності контролю.

Визначити наближений до дійсного вид розподілу контрольованого параметра й похибки вимірювань можливо, зокрема, шляхом послідовного аналізу специфіки реальних умов функціонування засобів НК та дослідження набору основних моделей ймовірнісних просторів шляхом обчислень ймовірностей помилкового виявлення дефектів (P_β , P_α) на основі виразів (4), (5) та вірогідності (D) результату контролю при постійному значенні похибки вимірювань (Δx) та довірчих границь (x_n і x_v) контрольованого параметра. Такі розрахунки доцільно починати з визначення “найгірших” (занижених) оцінок указаних показників, а як “нульове наближення” до дійсного розподілу параметрів x і похибок Δx скористатись законом рівномірного розподілу указаних величин [7, с. 96...98; 21, с. 236...239]. Для прикладу розглянемо такий варіант розрахунків.

Рівномірна модель розподілу допустима для будь-якого значення контрольованого параметра x у межах довірчого інтервалу $x_n < x < x_v$, реальний результат вимірювання якого x_i супроводжується випадковою похибкою Δ . Розподіл похибки засобу вимірювальної техніки при цьому може бути різним [21, с. 240].

Для рівномірного розподілу контрольованого параметра в зоні допуску аналітичний вираз щільності розподілу має вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{x_v - x_n}, \quad (6)$$

а для рівномірного розподілу випадкової похибки вираз щільності розподілу має вигляд:

$$\varphi(\Delta) = \frac{1}{2\eta} = \frac{1}{2\Delta\bar{x}}. \quad (7)$$

Після підстановки виразів розподілів контрольованого параметра (6) та випадкової похибки (7) у (4), (5) отримуємо значення ймовірностей помилкового виявлення дефекту P_β та пропуску дефекту P_α у вигляді:

$$P_\beta = \int_{x_n}^{x_n+\eta} f(x) \int_{-\eta}^{x_n-x} \varphi(\Delta) d\Delta dx + \int_{x_n-\eta}^{x_n} f(x) \int_{x_n-x}^{+\eta} \varphi(\Delta) d\Delta dx = \frac{\eta}{2(x_n - x_n)} = \frac{\Delta\bar{x}}{2(x_n - x_n)}; \quad (8)$$

$$P_\alpha = \int_{x_n-\eta}^{x_n} f(x) \int_{x_n-x}^{+\eta} \varphi(\Delta) d\Delta dx + \int_{x_n}^{x_n+\eta} f(x) \int_{-\eta}^{x_n-x} \varphi(\Delta) d\Delta dx = \frac{\eta}{2(x_n - x_n)} = \frac{\Delta\bar{x}}{2(x_n - x_n)}. \quad (9)$$

Відомо, що ймовірність виявлення P_v та ймовірність пропуску P_α дефектів складають повну групу несумісних подій, відповідно ймовірність виявлення дефекту визначиться з відношення:

$$P_v = 1 - P_\alpha.$$

Інтегральна вірогідність D отриманих оцінок похибки вимірювань та ймовірнісних показників вимірювального контролю як міра довіри до результатів контролю, пов'язана з ймовірностями прийняття безпомилкових рішень про наявність та відсутність дефектів. Кількісно визначається сумою ймовірностей фактів, що працездатний об'єкт визнається працездатним (P_w), а непрацездатний об'єкт визнається непрацездатним (P_v), а кожна з них описується відповідно різницею ймовірностей $P(E) - P_\beta$ та $P(\bar{E}) - P_\alpha$, де $P(E)$ і $P(\bar{E})$ – ймовірність гіпотези працездатного й непрацездатного стану об'єкта за оцінюваним параметром x [7, с. 189]. Тобто, кількісно вірогідність результатів методів метрологічного контролю D оцінюється за формулою:

$$D = P_w + P_v = P(E) - P_\beta + P(\bar{E}) - P_\alpha = 1 - (P_\alpha + P_\beta), \quad (10)$$

де: $P(E) + P(\bar{E}) = 1$ – група несумісних подій.

Наведений методичний підхід щодо оцінювання достовірності вимірювальних методів дефектоскопічного контролю дає змогу визначати оцінки ймовірностей виявлення дефектів (P_v , P_α , P_β), похибки вимірювань ($\Delta\bar{x}$) та вірогідності результатів контролю (D) з урахуванням характеристик (діапазон зміни і вид розподілу) вимірюваного параметру та засобу вимірювальної техніки.

Розглянемо порядок визначення показників достовірності методів дефектоскопічного

контролю, у яких факт виявлення дефекту представляється у формі кінцевого рішення.

У такому варіанті контролю у кожній з реалізацій дефектоскопічного процесу за результатом вимірювань контрольованого параметра приладом приймається рішення про наявність чи відсутність дефекту ψ згідно з правилом – сигнал приладу приймає значення: $x_1 = 1$ (дефект виявлено) з ймовірністю $p(\psi)$, або $x_2 = 0$ (дефекту не виявлено) з ймовірністю $1 - p(\psi)$. При цьому, кількість m випадків виявлення дефекту в n реалізаціях процесу дефектування є величиною випадковою.

За відсутності достовірної інформації щодо функції (чи густини) розподілу контрольованого параметра й похибки вимірювань визначити аналітично класичну ймовірність $p(\psi)$ настання випадкової події виявлення дефекту ψ проблематично. Але відомі шляхи наближеного вирішення завдання на базі зручних математичних схем.

Зокрема, коли кількість можливих результатів елементарних вимірювань складає обмежене число значень (маємо: $x_i = 0$, або $x_i = 1$), а ймовірності появи кожного з них вважаються близькими, як статистична оцінка $\bar{p}(\psi)$ ймовірності $p(\psi)$ події виявлення дефекту ψ допускається приймати частоту правильного виявлення дефектів: $\frac{m}{n}$, де m – число правильно виявлених дефектів у ході дефектування, а n – загальне число проведених актів дефектування. Причому, збільшення числа проведених діагностувань n наближає частоту $\frac{m}{n}$ до рівня статистичної оцінки ймовірності $\bar{p}(\psi)$, яка при певних умовах стає аналогом ймовірності виявлення дефекту P_v [28, с. 21].

Як і у варіанті з оцінювання показників достовірності вимірювальних методів контролю, статистичну оцінку $\bar{p}(\psi)$ частоти $\frac{m}{n}$ можемо визначити експериментально за обмеженою вибіркою n результатів випробувань, проведених за атестованою методикою з використанням робочих еталонів та атестованих зразків дефектних деталей системи експлуатаційного метрологічного контролю [1, с. 196...202; 5, с. 19...21].

Отримане в ході діагностувань на атестованих зразках дефектних деталей значення статистичної оцінки $\bar{p}(\psi)$ може бути прийнятим як ймовірність виявлення дефектів $p(\psi)$, якщо величина абсолютної похибки $\Delta p = |\bar{p}(\psi) - p(\psi)|$ від такої заміни не перевищує певний поріг h , кількісна величина якого обумовлюється технічними характеристиками дефектоскопічного обладнання, його чутливістю і роздільною здатністю.

Величина абсолютної похибки Δp залежить від загального числа актів дефектування n і для визначення значення порогу h похибки, який забезпечить досягнення обумовленої достовірності оцінки імовірнісних показників контролю, необхідно встановити відповідний обсяг представницької вибірки діагностувань n [24, с. 111...113].

Суть підходу щодо визначення необхідного обсягу актів дефектувань n полягає в наступному.

За наведеними нижче формулами (8, 9) обчислюємо математичне очікування $M(m)$ й дисперсію $S(m)$ числа правильно виявлених дефектів m в n реалізаціях дефектоскопічного контролю:

$$M(m) = x_1 p(\psi) + x_2 (1 - p(\psi)) = p(\psi); \quad (11)$$

$$S(m) = [x_1 - M(m)]^2 p(\psi) + [x_2 - M(m)]^2 (1 - p(\psi)) = p(\psi) \times (1 - p(\psi)) \quad (12)$$

Як оцінку ймовірності $p(\psi)$ можемо прийняти відношення $\frac{m}{n}$ і представити його у вигляді:

$$\frac{m}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_j, \quad (13)$$

де m_j – кількість виявлень дефекту в реалізації j .

Тоді формули математичного очікування й дисперсії частоти $\frac{m}{n}$ приймають вид:

$$M(m/n) = \bar{p}(\psi); \quad (14)$$

$$S(m/n) = \frac{\bar{p}(\psi)(1 - \bar{p}(\psi))}{n}. \quad (15)$$

При великих значеннях n ($n \geq 50$) в силу центральної теореми ймовірностей розподіл частоти $\frac{m}{n}$ стає близьким до нормального. Це дає змогу для вибраного нами значення довірчої ймовірності P (для практичних цілей – на рівні $0,95 \div 0,98$) визначити з таблиць нормального розподілу значення коефіцієнта t_α , при якому середньоквадратичне відхилення статистичної оцінки $\bar{p}(\psi)$ оцінюється за формулою [25, с. 18...21; 28, с. 13...15]:

$$\bar{\sigma} = t_\alpha \sqrt{\frac{\bar{p}(\psi)(1 - \bar{p}(\psi))}{n}}. \quad (16)$$

При значеннях $n \gg 1$ середньоквадратичне відхиленню $\bar{\sigma}$ служить абсолютною оцінкою точності результату оцінювання $\Delta \bar{p}$, а відповідно і ймовірності виявлення дефектів P_v . Оцінка ймовірності виявлення дефектів P_v з урахуванням довірчого інтервалу становитиме $P_v = \bar{p}(\psi) \pm \Delta \bar{p}$.

Кількість дефектувань n , необхідних для отримання частоти $\frac{m}{n}$, яка забезпечить необхідне значення точності $\Delta \bar{p}$ й вірогідності D , визначиться з формули [24, с. 112]:

$$n = t_\alpha^2 \frac{p(\psi)(1 - p(\psi))}{\Delta p^2}. \quad (17)$$

Значення ймовірності $p(\psi)$ у формулі (17) зазвичай невідоме і для його практичного визначення проводиться близько 100 реалізацій актів дефектування n_0 , за результатами яких обчислюється частота події $\frac{m}{n_0} = \bar{p}(\psi)_0$. Необхідне значення числа n визначається за умови, що

$$p(\psi) = \bar{p}(\psi)_0 \approx \frac{m}{n_0}. \quad (18)$$

Ймовірність виявлення дефекту P_v і ймовірність пропуску дефектів P_a складають повну групу протилежних подій, тому ймовірність пропуску дефектів P_a визначається за формулою:

$$P_a = 1 - P_v.$$

Статистична оцінка ймовірності помилкового виявлення дефекту P_β може бути визначена в ході експериментальних досліджень щодо оцінювання частоти $\frac{m}{n}$ при визначенні оцінки ймовірності виявлення дефекту P_v . Для цього в ході дослідження з оцінювання частоти $\frac{m}{n}$ достатньо реєструвати кількість випадків помилкового виявлення дефекту k , за яким необхідно обчислити значення частоти $\frac{k}{n}$ та статистичної оцінки $\bar{p}(k)$, яка за умови $|\bar{p}(k) - p(k)| \leq h$, може бути прийнята як ймовірність помилкового виявлення дефекту P_β . Значення порогу h похибки, а відповідно й точність $\Delta \bar{p}$, визначено на етапі оцінювання ймовірності P_v .

Визначені значення ймовірностей пропуску дефектів P_a та помилкового виявлення дефекту P_β дають змогу обчислити інтегральну інструментальну вірогідність D , як міру довіри до результатів контролю (оцінок ймовірностей виявлення дефектів та похибки контролю) за формулою $D = 1 - (P_a + P_\beta)$ [7, с. 167].

Слід зазначити, що у випадку впровадження запропонованого методичного підходу для оцінювання достовірності результатів контролю конкретних елементів конструкції ЛА доцільніше використовувати формулу диференційної вірогідності, яка характеризує міру довіри до результату контролю конкретного об'єкта [8, с. 130]. В такому випадку вірогідність рішення про відсутність дефекту обчислюється за формулою:

$$D_0 = \frac{P_u - P_\beta}{P_u - P_\beta + P_a}, \quad (19)$$

де P_u – ймовірність того, що на контроль поступив справний об'єкт.

Висновки

Проведений аналіз публікацій та нормативно-методичних документів з питань неруйнівного контролю й метрології засвідчив відсутність унормованого тлумачення терміну достовірності та її кількісної оцінки. Тому в роботі для кількісної оцінки достовірності методів дефектоскопічного

контролю використовуються найбільш поширені показники – похибка (вимірювання, оцінювання) та вірогідність результатів контролю.

На основі аналізу нормативно-методичних документів з питань неруйнівного контролю й метрології та технології виявлення дефектів при проведенні дефектоскопічного контролю елементів конструкції В і Д розроблено методичний підхід щодо кількісного оцінювання показників надійності виявлення дефектів і достовірності результатів контролю, який дає змогу проводити порівняльну оцінку ефективності методів дефектоскопічного контролю за указаними показниками ефективності.

Використання запропонованих підходів до кількісного оцінювання показників достовірності методів дефектоскопічного контролю дасть змогу обґрунтовано удосконалювати технологію діагностування в ході технічного обслуговування ЛА, що підвищить ймовірність виявлення дефектів.

Застосування запропонованих методичних підходів для оцінювання надійності й достовірності

результатів дефектоскопічного контролю в ході виконання технічного обслуговування ЛА потребує уточнень і поправок статистичних оцінок параметрів дефектів та створення систематизованої бази даних результатів контролю конструкції ЛА з урахуванням впливу експлуатаційних факторів. Формування такої бази даних доцільне шляхом впровадження в процес експлуатації ЛА Лабораторії технічного діагностування АТ.

Напрями подальших досліджень. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку структури бази даних результатів контролю в ході виконання технічного обслуговування основних, найбільш напружених, елементів конструкції ЛА та на визначення фактичних, з урахуванням впливу експлуатаційних факторів, статистичних закономірностей (виду розподілу та густини розподілу ймовірностей) параметрів дефектів елементів конструкції ЛА.

Список літератури

1. Дефектоскопия деталей при эксплуатации авиационной техники. – М.: Воениздат, 1978. – 231 с.
2. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення: – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.
3. Контроль неразрушающий авиационной техники. Требования к применению, организации и проведению работ. – М.: Стандартиформ, 2013. – 12 с.
4. ГОСТ 13216:74. Планирование испытаний на надежность. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 15 с.
5. ДСТУ В 3263-95. Метрологічна експертиза зразків і комплексів озброєння та військової техніки. – К.: Держстандарт України, 1996. – 26 с.
6. Ружин П.О., С.Т. Пацера, В.АК. Дербаба, В.І. Корсун. Вплив невизначеності вимірювань на відсотки неправильно забракованих деталей при двофакторному контролі. Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, Вип. № 4, 2018. – С. 140–149.
7. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. – Вінниця: ВЕЛЕС, 2001. – 219 с.
8. Кошова Л.А. Забезпечення єдності вимірювань. Концептуальні засади. Монографія. – К.: НАУ, 2009. – 178 с.
9. ДСТУ 2865-94. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.
10. ГОСТ 20911 89. Техническая диагностика. Термины и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 15 с.
11. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – К.: Держстандарт України, 2006. – 19 с.
12. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) неразрушающего контроля. Термины и определения. Серия 28. Вып.4. – М.: Стандартиформ, 2003. – 260 с.
13. Енциклопедія термінів, визначень і пояснень будівельних матеріалів. Система неруйнівного контролю. Види (методи) і технологія неруйнівного контролю. – К.: Вид-во Мінрегіонбуд України, 2006. – 496 с.
14. Демченко М.О., Филиппова М.В., Безручко В.М. Системи неруйнівного контролю балочних споруд. Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, Вип. № 6, 2015. — С. 39–42.
15. Достоверность керновых проб и выбор диаметров скважин при разведке месторождений. Под ред. Ю.Т. Морозова. – Л.: Недра, 1982. – 59 с.
16. Бачурін С.М., Заруба О.Г., Шишацький Р.В. Основні положення методики оцінювання ефективності функціонування системи збору трофейних зразків озброєння та військової техніки. Збірник наукових праць. – Черкаси: ДНДІ ВС ОВТ, Вип. №1(15), 2023. – С. 20–25.
17. Осадчук О.В., Семенов А.О., Барабан С.В. Підвищення вірогідності неруйнівного контролю структурних перетворень некристалічних напівпровідників. Вінницький національний технічний університет. Електротехнічні та радіотехнічні вимірювання. – Вінниця: “Велес”, 2012. – С. 43–48.
18. Шматко Д.З., Кочнєва О.В. Обчислення вірогідності визначення дефектів деталей методами неруйнівного контролю. – Вінницький національний технічний університет. Електротехнічні та радіотехнічні вимірювання. – Вінниця: “Велес”, 2017. – С. 51–54.
19. ДСТУ EN 1330-2:2008. Контроль неруйнівний. Термінологія. – К.: Держстандарт України, 2006. – 21 с.

20. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л. Д. Основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
21. Ціделко В.Д., Яремчик М.А., Затока С.А., Бурченков Г.К., Шведова В.В. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки. – К.: “Політехніка”, т. 2, 2013. – 236 с.
22. Закон України “Про технічні регламенти та оцінку відповідності.” – Закон № 2496-VIII від 10.07.2018.
23. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократным повторением. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
24. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
25. Мильграм Ю.Г. Таблицы и графики для вероятностных расчетов. Часть первая. – М.: Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1974. – 381 с.
26. Справочник по прикладной статистике. Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, т. 1. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 510 с.
27. ДСТУ 2681-94. Державна система єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с.
28. ГОСТ 11.004:74 (СТ СЭВ 876-78). Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 29 с.
29. Кузьмич О.Є., Аркушенко П.Л., Андрушко М.В., Гайдак І.Г., Пашенко С.В. Розгляд алгоритму експлуатації авіаційної техніки Державної авіації України “за станом” з використанням наземних засобів технічного контролю та систем бортових вимірювань. – Чернігів: ДНДІ ВС ОБТ, Вип. №3, 2021. – С. 73–78.

Надійшла до редколегії 01.12.2023

Схвалена до друку 25.12.2023

Відомості про авторів:

Жикол Павло Олександрович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9891-5097>

Чусь Дмитро Іванович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7956-601X>

Белінська Регіна Борисівна

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1972-4685>

Information about the authors:

Pavel Zhikol

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9891-5097>

Dmitro Chuse

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7956-601X>

Rehina Bielinska

Researcher Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1972-4685>

A METHODOICAL APPROACH TO ASSESSING RELIABILITY INDICATORS OF METHODS OF DEFECTOSCOPIC CONTROL OF STRUCTURAL ELEMENTS OF AIRCRAFT

P. Zhikol, D. Chuse, R. Belinska

The main indicators of the effectiveness of the defectoscopic control of aircraft structural elements are the reliability and validity of the control results, which are subject to mandatory metrological control.

Currently, in the publications and normative-methodical documents on issues of non-destructive testing and metrology, there are no works on methods of assessing the reliability of the results of defectoscopic control of aircraft structures, very limited data on the reliability of detecting defects by various methods of non-destructive testing.

In the article, based on the analysis of the functional capabilities of defectoscopic control methods, it is established that in the process of defecting aircraft structural elements, various technologies for determining the fact of the presence of a defect are implemented, which lead to different approaches to assessing the reliability of control results.

Based on the analysis of methods for assessing the reliability of measurement results in metrology and conducted research, methodical approaches to the quantitative assessment of the reliability indicators of defectoscopic control methods are proposed, which are based on the empirical determination of statistical estimates of the parameters of defects of working standards and certified samples of defective parts.

Keywords: Aircraft, structural element, defect, detection, diagnosis, defectoscopic control, probability, root mean square deviation, accuracy, measurement error, reliability, working standards, control probability.