

АНАЛІЗ МЕТОДИК МЕТРОЛОГІЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

- Є.В. Рижов**, ад'юнкт Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів
М.Ю. Яковлев, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів
О.В. Ходич, аспірант інституту спеціального зв'язку та захисту інформації НТУУ "КПІ", м. Київ
П.Л. Аркушенко, начальник відділення державного науково-випробувального центру Збройних Сил України, м. Чернігів



Є.В. Рижов



М.Ю. Яковлев



О.В. Ходич



П.Л. Аркушенко

Проаналізовано відомі методики метрологічної експертизи складних технічних систем, що застосовуються на етапі їх розробки, та визначено їх основні недоліки. Запропоновано шляхи вдосконалення методик метрологічної експертизи складних технічних систем, що дасть можливість підвищити ефективність їх метрологічного забезпечення.

The analysis of the known methods of metrological testing of complex technical systems that are used during their development stage is provided in the article; the shortcomings of the methods are defined. The ways to improve the methods of metrological testing of complex technical systems, that will enable the increase of effectiveness of the metrological support, are suggested.

Постановка проблеми

У забезпеченні необхідних значень якісних показників складних технічних систем (СТС) на всіх етапах життєвого циклу важлива роль відводиться їх метрологічному обслуговуванню (МОБ) при встановленні реального технічного стану. Ефективність проведення МОБ СТС залежить від кількості та номенклатури вимірюваних параметрів (ВП). У той же час необґрунтовано велика кількість ВП призводить до збільшення часу на проведення МОБ та встановлення реального технічного стану СТС у цілому і, як наслідок, до підвищення витрат на її експлуатацію.

При МОБ СТС відповідність їх показників якості технічним умовам визначається за результатами вимірювань значень діагностичних параметрів. Оцінка технічного стану СТС проводиться із ви-

користанням засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Достовірність оцінки технічного стану СТС залежить від обраних ЗВТ [1–4]. Обґрунтування вибору ЗВТ з урахуванням вимог до точності вимірювань є одним із напрямів удосконалення МОБ СТС [5] та актуальним завданням проведення метрологічної експертизи (МЕ) СТС [6]. Імовірність визначення справжнього технічного стану СТС, а також вартість їх МОБ залежать від метрологічних характеристик (МХ) ЗВТ. Наразі єдиної методики вибору ВП та мінімізації їх кількості, вибору номенклатури ЗВТ для визначення технічного стану СТС при проведенні МЕ, зважаючи на складність і різноманітність завдань [1–5], що вирішуються, не існує [7–9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існуючі методики вибору складу ВП під час встановлення технічного стану СТС не дозволяють установити їх мінімально необхідну кількість при проведенні МОБ, оптимізувати порядок їх вимірювання та скоротити час оцінювання технічного стану СТС [7, 10–14]. Все це призводить до збільшення витрат на МОБ СТС.

Відомі методики вибору номенклатури ЗВТ та обґрунтування їх МХ для МОБ СТС завищують вимоги до значення ймовірності правильної оцінки результатів вимірювань параметрів. Це в кінцевому результаті веде до збільшення витрат на експлуатацію ЗВТ, які обираються для проведення МОБ СТС. Відомі методики вибору номенклатури ЗВТ не відповідають умовам сучасності, оскільки спрямовані переважно на аналогові ЗВТ [2, 4, 8, 9, 15].

Таким чином, відомі методики МЕ не завжди є оптимальними за обраним критерієм, оскільки не враховують специфіки експлуатації сучасних СТС, особливо це стосується озброєння та військової техніки (ОВТ).

Мета статті — проаналізувати методики, які застосовуються при МЕ СТС на етапі їх розробки, визначити їх основні недоліки та запропонувати шляхи вдосконалення методик МЕ СТС.

Виклад основного матеріалу

Узагальнюючи матеріал, що наведено в [6], прийmemo, що метрологічна експертиза технічної документації — це аналіз і оцінка технічних рішень з вибору параметрів, які необхідно вимірювати, встановлення норм точності вимірювань та забезпечення методами і засобами вимірювання на етапах розробки, виробництва, випробувань, експлуатації та ремонту СТС. Основний склад робіт МЕ концентрується за такими напрямками: вибір (оптимізація) ВП; встановлення технічних та економічних обґрунтувань норм точності для вибору номенклатури ЗВТ; підготовка і проведення вимірювань такими методами і ЗВТ, які гарантують, що отримана похибка в результаті вимірювань не вийде за межі допустимої. Оскільки останній напрям досить повно розкрито у роботах [8, 9, 13], то зупинимось лише на першому та другому напрямках, які є основними та використовуються на всіх етапах МЕ СТС.

1. Аналіз методик вибору складу вимірюваних параметрів складних технічних систем під час встановлення їх технічного стану

У роботах [7, 10–14] розглянуто методики вибору складу ВП СТС для встановлення їх технічного стану.

У [10] пропонується методика визначення кількості ВП радіоелектронної апаратури для оцінки її технічного стану із заданою ймовірністю. Установлено, що обґрунтування кількості ВП, які необхідно контролювати, є одним із найважливіших етапів досліджень у галузі експлуатації авіаційної техніки за станом. Технічний стан радіоелектронної апаратури авіаційної техніки визначається шляхом проведення оцінки ВП зразка на основі вимірювання значень деяких параметрів. Формалізація процесу визначення кількості ВП забезпечується введенням поняття значущості кожного параметра, під якою розуміється ступінь впливу зміни значення параметра на характеристики зразка. Показано, що коефіцієнт значущості k_l визначається як ймовірність оцінки характеристики зразка авіаційної техніки при вимірюванні тільки одного l -го параметра:

$$k_l = 1 - \sigma_{ul}^* / \sigma_u,$$

де σ_{ul}^* — апостеріорне середньоквадратичне відхилення оцінюваної характеристики u при вимірюванні

тільки одного l -го параметра; σ_u — середньоквадратичне відхилення оцінюваної характеристики u .

Недоліком запропонованої методики є те, що не враховується кількість елементів, які формують параметр, та час вимірювання параметрів, що також впливає на важливість параметрів і забезпечує можливість встановлення порядку перевірки параметрів за ступенем зростання комплексного коефіцієнта.

У [11] запропоновано методику оптимізації ВП якості продукції у процесі МЕ технічної документації з використанням імовірнісних методів та методів функціонального аналізу. Її недоліком є те, що виключаються неінформативні параметри, які також можуть впливати на оцінку технічного стану продукції, що розглядається.

Роботу [12] присвячено знаходженню коефіцієнтів залежності між ВП СТС шляхом побудови та аналізу атрибутивного бінарного дерева. Недоліком є те, що оптимізація ВП відбувається за рахунок вимірювання тільки незалежних параметрів, які також можуть впливати на оцінку технічного стану СТС.

У роботі [13] запропоновано методику встановлення раціональної номенклатури параметрів, які необхідно контролювати при розробці та експлуатації СТС. Виключення параметрів при розробці та експертизі нормативних документів полягає в такому: визначають ймовірність того, що якщо виміряне у процесі контролю СТС значення параметра $X_1(X_2)$ знаходиться в межах заданих допусків, то і значення параметра $X_2(X_1)$ також є в межах заданих для нього допусків. Загальним принципом вирішення цього завдання є визначення умовних ймовірностей:

$$P_{11}(X_{n1}) \leq X_2 \leq X_{b2} / X_1 = X_{n1};$$

$$P_{12}(X_{n2} \leq X_2 \leq X_{b2} / X_1 = X_{b1}).$$

Якщо отримані значення ймовірностей P_{11} і P_{12} більше або рівні допустимому значенню P_d , то доцільно здійснювати контроль лише параметра X_1 , не контролюючи X_2 . Тобто параметр X_2 із раціональної номенклатури параметрів виключається. Як недолік слід відзначити, що зазначену методику складно застосувати на етапі розробки СТС, оскільки конструктор-розробник не має у своєму розпорядженні достатньої кількості вихідних даних [13], необхідних для її реалізації. Тому вона дозволяє здійснити лише наближені розрахунки при виконанні низки спрощуючих припущень.

У [7] подано цілий комплекс методик оцінювання обґрунтованості вибору ВП ОВТ на етапах їх розробки. Ці методики базуються на оцінюванні показників надійності, якості та чутливості ВП зразків ОВТ.

Перша методика базується на оцінці надійності елементів ОВТ. Її перевагою є те, що вона дозволяє оцінити надійність виробу ОВТ, проводити порівняння різних варіантів його виконання, знайти оптимальні рішення на найбільш ранніх етапах

розробки і проектування. Методика вимагає наявності даних про надійність елементів системи та зводиться до розробки і дослідження статистичної моделі виробу ОВТ. Таким чином, отримують оцінки надійності виробу ОВТ при обмежених витратах коштів і часу. Її перевагою є те, що у процесі дослідження можуть визначатися не тільки надійнісні характеристики і показники, а й показники ефективності. Основний недолік методики полягає в тому, що отримані результати подано не у вигляді аналітичних виразів, що відображають вплив різних чинників, а у вигляді чисельних оцінок.

Наступною є методика, що ґрунтується на оцінюванні показника якості виробу ОВТ. Вона використовується для завдань контролю технічного стану виробів ОВТ із застосуванням вимірювального підходу, що базується на інформації, яка отримується при використанні ЗВТ. З її допомогою визначається більшість показників якості. Основною перевагою цієї методики є забезпечення високої достовірності та необхідної точності отриманих результатів. Вона дозволяє отримувати легко відтворювані числові значення показників якості. Недоліками слід вважати складність і тривалість операцій вимірювання деяких параметрів, необхідність спеціальної підготовки персоналу, придбання складного, зазвичай дорогого устаткування, а в ряді випадків і необхідність демонтажу та розбирання виробів ОВТ.

Остання методика базується на оцінюванні чутливості параметрів до зміни функцій передачі виробу ОВТ. У виробі ОВТ функції передачі залежать від її структури і параметрів. Будь-яка їх зміна призводить до коригування відповідних функцій передачі. У зв'язку з цим різна чутливість функцій передачі визначається як ступінь їх зміни при варіюванні якого-небудь параметра. Порівнюючи чутливості функцій передачі, впорядковують ВП за впливом на зміну стану ОВТ, що дає можливість скласти алгоритм пошуку дефекту. Реалізація алгоритмів пошуку дефекту при цьому здійснюється шляхом визначення коефіцієнтів передачі всього виробу ОВТ з подальшою локалізацією дефектів через рівняння зв'язку між коефіцієнтами і параметрами. Поряд із тим, недоліком є незручності, що виникають при застосуванні методики і полягають у складності отримання функцій чутливості динамічних характеристик до зміни параметрів, що характеризують стан ОВТ. Причому, зі збільшенням глибини пошуку дефекту або складності структури ОВТ ці незручності зростають.

Загальним недоліком методик, запропонованих у [7], є те, що вони не дозволяють встановити мінімально необхідну кількість ВП, які слід контролювати. Їхній зміст викладено не повністю і незрозуміло, що не дає можливості використати їх практично при проведенні МЕ ОВТ.

Найбільш доступним, із можливістю подальшого використання на практиці, є підхід, запропоно-

ваний у [14], який дозволяє із заданою ймовірністю та за мінімальний час оцінити реальний технічний стан техніки зв'язку під час проведення технічного обслуговування. Запропоновано формулу розрахунку ймовірності першочергового вибору ВП i :

$$W_i = \frac{T_{\text{то}} C_{\text{то}} v_i p_i}{t_i c_i q_i}, \quad (1)$$

де W_i – ймовірність першочергового вибору ВП i ; $T_{\text{то}}$, $C_{\text{то}}$ – тривалість та вартість проведення технічного обслуговування відповідно до інструкції; v_i – значимість впливу параметра i на працездатність техніки зв'язку; p_i – ймовірність працездатності техніки зв'язку, якщо параметр i в нормі; t_i , c_i – тривалість та вартість вимірювання значення параметра i ; q_i – ймовірність помилки оператора в оцінці значення параметра i .

Недоліком зазначеного підходу є те, що не використовуються відмінності вагових коефіцієнтів параметрів техніки зв'язку, які формують порядок та час її вимірювання, що, у свою чергу, зменшує достовірність отриманих результатів.

2. Аналіз методик вибору номенклатури засобів вимірювальної техніки для метрологічного обслуговування складних технічних систем

У роботах [2, 4, 8, 9, 15] розглянуто методики вибору номенклатури ЗВТ для МОБ СТС.

Наприклад, у [8, 9] подано методики щодо оцінки відповідності МХ та вибору номенклатури ЗВТ.

У роботі [8] пропонується методика розрахунку допустимої похибки вимірювань при оцінюванні правильності вибору ЗВТ за точністю. Вона використовується при розробці нових ЗВТ. Запропонована методика полягає у розрахунку допустимого значення сумарної похибки результату вимірювань параметру при контролі двостороннього ($\pm \delta_{\text{п}}$) та одностороннього ($+\delta_{\text{п}}$ чи $-\delta_{\text{п}}$) допуску:

$$\Delta_{\Sigma \text{доп}} = |\delta_{\text{п}}| \cdot R,$$

де R – допустиме співвідношення між сумарною похибкою вимірювань і допустимим відхиленням параметра, що контролюється.

Недоліком запропонованої методики є те, що її складно застосувати конструктору-розробнику, оскільки вона потребує великої кількості вихідних даних [8] (наприклад, інформації про середньоквадратичне відхилення параметра, що контролюється, невідомого закону розподілення параметра тощо) для розрахунку допустимих значень сумарної похибки результату вимірювань, які необхідні для її реалізації. Тому вона дозволяє здійснити лише наближені розрахунки, при виконанні низки спрощених припущень.

У [9] запропоновано методику оцінювання правильності визначення складу МХ ЗВТ, що необхідно контролювати, яка полягає у такому. Введено

скорочену програму повірки ЗВТ, яка передбачає її мінімально допустимий об'єм у залежності від конкретних умов застосування на зразках ОВТ. Тобто, ті МХ ОВТ, які не передбачається калібрувати, відкидають, за рахунок чого і відбувається мінімізація об'єму повірки. Недоліком вважається те, що розробка ЗВТ під конкретні умови застосування збільшує їх різноманітність.

Загальним недоліком методик, наведених у [8, 9], є те, що вони завищують час на проведення вимірювань та потребують великих грошових ресурсів. Результати, які отримуються при використанні зазначеного комплексу методик, завищені і не відповідають дійсності. Їхній зміст викладено не повністю і незрозуміло, що не дає можливості використати їх практично при проведенні МОБ та застосувати в цілому для МЕ СТС.

У [15] наведено методику вибору ЗВТ за точністю для МОБ та під час експлуатації СТС. Завдання вирішується вибором ЗВТ за заданим значенням сумарної похибки вимірювань, що складається з методичної та суб'єктивної похибок, які вносяться оператором, а також похибки ЗВТ. Її недоліком є відсутність можливості врахування впливу МХ ЗВТ на час визначення технічного стану СТС, що обслуговуються і ремонтуються, хоча в низці робіт показано тісний взаємозв'язок МХ ЗВТ і середнього часу відновлення працездатності СТС [1, 2, 4].

Найбільш доступним, із можливістю подальшого використання на практиці, є підхід, запропонований у [4], який дозволяє при виконанні ремонту агрегатним методом врахувати вплив МХ ЗВТ на час визначення технічного стану СТС, що обслуговуються і ремонтуються. Проведено аналіз із урахуванням умовних алгоритмів діагностування будь-якого виду, а саме, бінарного, однорідного, групового досконалої форми, що дозволяє зменшити ймовірність правильної оцінки результату ВП ЗВТ. Його недоліком є те, що врахування впливу МХ ЗВТ на час визначення технічного стану СТС, що обслуговуються і ремонтуються, не залежить від послідовності ВП, допустиме значення ймовірності правильної оцінки результату ВП визначається у припущенні реалізації умовного алгоритму лише досконалої форми. Тобто для всіх видів і форм умовних алгоритмів діагностування використовується одна й та ж формула, розроблена тільки для досконалої форми умовного алгоритму:

$$\rho(m \geq 2) = 0,5 \left(K + \frac{L-1}{m-1} \right) (1-p) p^{K-1}, \quad (2)$$

де ρ – математичне сподівання відхилення у визначенні технічного стану СТС; m – модуль вибору алгоритму (кількість можливих оцінок результату ВП); K – середня кількість вимірювань значень параметрів СТС; L – кількість можливих станів СТС, включаючи справний стан; p – значення ймовір-

ності правильної оцінки результату вимірювання параметра СТС.

Використання виразу (2) призводить до завищення оцінки значень математичного сподівання відхилення визначеного технічного стану від істинного і завищення вимог до МХ ЗВТ.

Відомо, що достовірність установлення технічного стану СТС визначається МХ вбудованих і зовнішніх ЗВТ, які використовуються у процесі їх МОБ, а саме, класом точності і значенням p . Значення p змінюється від 0,6 до 0,9997 у залежності від ЗВТ, які використовуються, і це впливає на їхню вартість. Так, наприклад, для універсальних вольтметрів зміна класу точності з 0,02 до 0,002 збільшує їх вартість у 7,5 разу [1, 3].

3. Основні завдання щодо удосконалення методик метрологічної експертизи складних технічних систем

Слід відзначити, що завдання удосконалення методик МЕ СТС має вирішуватися комплексно, з урахуванням їх взаємного впливу.

1. З метою удосконалення методики вибору складу ВП СТС під час установлення їх технічного стану необхідно:

- провести експертне опитування для отримання вихідних даних та поряд із традиційними математичними апаратами, які застосовуються при вирішенні вказаного завдання, застосувати математичний апарат нечітких множин, оскільки він є найкращим для опрацювання результатів експертного опитування. Додатково використати математичний апарат теорії множин для моделювання структури СТС;

- параметри СТС розглянути з трьох сторін, а саме: відносної важливості параметрів R_{Π} (визначається експертним опитуванням), кількості елементів, що формують параметр Re_i (визначається з принципової схеми СТС), часу вимірювання параметрів $R\theta_i$ (визначається з інструкції по технічному обслуговуванню СТС);

- після отримання значень R_{Π} , Re_i і $R\theta_i$ для кожного параметра визначити їх вагові коефіцієнти відносної важливості.

Отже, реалізація зазначених у цьому пункті пропозицій дозволить удосконалити методику вибору складу ВП СТС під час установлення їх технічного стану (1) [14]. Узагальнення отриманих результатів дозволить оптимізувати кількість ВП СТС та визначити порядок перевірки параметрів за ступенем зростання комплексного коефіцієнта W_i .

2. Для удосконалення методики вибору номенклатури аналогових і цифрових ЗВТ, які застосовуються під час МОБ, необхідно врахувати алгоритми діагностування, а саме:

- розробити з використанням виразу (2) нові функціональні залежності математичного сподівання відхилення технічного стану СТС від його

істинного значення, які дозволяють визначати значення МХ аналогових ЗВТ з урахуванням реалізації умовного алгоритму діагностування будь-якого виду (бінарного, однорідного, групового) та його форми (крім досконалої додатково розглянути мінімальну, довільну та максимальну форму), що забезпечить зменшення витрат на МОБ СТС;

- розробити методику обґрунтування МХ аналогових ЗВТ для їх МОБ із використанням отриманих функціональних залежностей, що пов'язують значення ймовірності правильної оцінки результату вимірювання з математичним сподіванням відхилення у визначенні технічного стану СТС;

- установити залежності впливу кількості розрядів цифрових ЗВТ на значення ймовірності правильної оцінки результату виконання вимірювань;

- із використанням отриманих результатів розробити методику формування вимог до МХ цифрових ЗВТ, яка буде враховувати вплив якості алгоритмів обслуговування і ремонту СТС на їх МОБ.

Висновки

На основі проведеного в статті аналізу відомих методик МЕ СТС встановлено, що існуючі методики вибору складу ВП не дають можливості зменшити їх кількість, а методики вибору номенклатури ЗВТ завищують вимоги до значення ймовірності правильної оцінки результатів вимірювань параметрів. Усе це веде до збільшення тривалості проведення МОБ та витрат на експлуатацію СТС у цілому.

Список літератури

1. Ксенз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств / С.П. Ксенз. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.
2. Сакович Л.Н. Выбор средств измерений согласно требованиям к ремонтпригодности средств связи / Л.Н. Сакович, В.Н. Дзюба, В.П. Павлов // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 23–25.
3. Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации / под ред. С.П. Ксенза. – Л.: ВАС, 1990. – 336 с.
4. Сакович Л.Н. Определение метрологических характеристик средств измерений для обслуживания и ремонта средств связи / Л.Н. Сакович, В.Н. Дзюба, В.П. Павлов // Зв'язок. – 2003. – № 5. – С. 17–19.
5. Яковлев М.Ю. Аналіз системи метрологічного обслуговування засобів зв'язку Сухопутних військ та визначення основних напрямків її удосконалення / М.Ю. Яковлев, Є.В. Ри-

жов // Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ. – 2012. – Вип. 1 (6). – С. 183–192.

6. Наказ Міністра оборони України від 15 грудня 2006 р. № 731 “Положення про проведення метрологічної експертизи документації на озброєння та військову техніку”. – 15 с.
7. Типовые методики метрологической экспертизы образцов и комплексов вооружения и военной техники (рекомендательные): в 4 кн. Кн. 2: Методика оценки обоснованности выбора контролируемых параметров и их допустимых отклонений. – МО СССР. – М.: Воениздат, 1985. – 37 с.
8. Типовые методики метрологической экспертизы образцов и комплексов вооружения и военной техники: в 4 кн. Кн. 3: Методика оценки единства, точности измерений и достоверности контроля параметров. – МО СССР. – М.: Воениздат, 1986. – 68 с.
9. Типовые методики метрологической экспертизы образцов и комплексов вооружения и военной техники: в 4 кн. Кн. 4: Методика оценки качества средств и систем измерений и контроля. – МО СССР. – М.: Воениздат, 1986. – 61 с.
10. Воронін А.В. Методика визначення кількості вимірюваних параметрів радіоелектронної апаратури при експлуатації авіаційної техніки за станом / А.В. Воронін, М.В. Гудков // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2011. – Вип. 2 (92). – С. 68–70.
11. Методика оптимізації контрольованих параметрів якості продукції у процесі метрологічної експертизи технічної документації / Л.М. Віткін, В.У. Ігнаткін, В.А. Литвиненко, О.І. Білий // Там само. – 2009. – Вип. 6 (80). – С. 149–155.
12. Хижняк В.В. Метод оптимізації вимірюваних параметрів складних технічних комплексів на основі атрибутуваного бінарного дерева / В.В. Хижняк, С.В. Герасимов, І.Е. Бакулин // Український метрологічний журнал. – 2009. – № 4. – С. 45–49.
13. Метрологическая экспертиза технической документации / Ю.Н. Яковлев, Н.Г. Глушкова, Н.Я. Медовикова [и др.]. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 184 с.
14. Сакович Л.Н. Выбор параметров и последовательности их измерения при техническом обслуживании средств связи по состоянию / Л.Н. Сакович, Р.А. Бобро // Зв'язок. – 2006. – № 3. – С. 54–56.
15. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.