Ю.Б. Прібілев¹, С.В. Герасимов², М.В. Борисенко²

¹Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ

²Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ГРАФОАНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД КОМПРОМІСНОГО РОЗПОДІЛУ ВИТРАТ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАПАСУ ТОЧНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ КОНТРОЛЬНО-ВИПРОБУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

У статті розроблено графоаналітичний метод компромісного розподілу витрат на забезпечення запасу точності та надійності елементної бази залежно від характеру прискорення процесу старіння вимірювальних каналів контрольно-випробувальної станції. Показано вплив зростання похибки вимірювальних каналів контрольно-випробувальної станції з різними рівнями початкової точності та швидкості зміни на час метрологічної справності таких каналів. Розглянуто використання технологічних прийомів для забезпечення надійності елементної бази вимірювальних каналів та зменшення швидкості втрачання запасу точності. Запропоновано при обмеженому фінансуванні побудови вимірювальних каналів для вирішення завдання раціонального розподілу витрат між витратами на забезпечення запасу точності та витратами на забезпечення надійності елементної бази використовувати графоаналітичний метод.

Ключові слова: зенітні ракетні комплекси, зенітна керована ракета, контрольно-випробувальна станція, вимірювальний канал, метрологічна надійність, похибка.

Вступ

Постановка проблеми. Застосування зенітного ракетного озброєння Повітряних Сил Збройних Сил (ЗС) України є найбільш ефективним способом боротьби з засобами повітряного нападу противника. Зенітні ракетні комплекси (ЗРК) є високотехнологічним видом озброєнь та військової техніки, що побудовані зі застосуванням сучасних інформаційних технологій на базі складної радіоелектронної апаратури (РЕА), та вимагають застосування досконалих засобів контролю технічного стану [1–2]. Для перспективних ЗРК, що побудовані на базі сучасних технологій та елементної бази необхідно збільшення точності вимірювань при контрольно-випробувальних роботах для достовірного визначення технічного стану (ТС) зенітних керованих ракет (ЗКР) [1; 3–4]. Визначення придатності ЗКР до застосування виконується за допомогою контрольно-випробувальних станцій (КВС), які входять до складу ЗРК.

КВС, які є на постачанні у ЗС України, є спеціалізованими (прив'язаними до конкретного типу ЗКР), морально, технічно та конструктивно застарілими та мають незадовільний ТС [1]. Модернізація цих КВС економічно недоцільна через вироблення експлуатаційного ресурсу РЕА та великі витрати, що майже досягають витрат на побудову нової КВС. Побудова універсальної автоматизованої КВС за базово-модульним принципом із застосуванням сучасних технологій, зменшить витрати на контроль

та дозволить проводити обслуговування декількох типів ЗКР [5–6]. Одною із основних характеристик КВС є експлуатаційний ресурс, який визначається, перед за все, метрологічною справністю засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та вимірювальних каналів (ВК), що є основними складовими КВС. Час метрологічної справності ВК КВС залежить від початкового рівня їх точності, який закладений виробником при їх виробництві та поступово витрачається з часу. Але швидкість цього витрачання початкового запасу точності ВК може бути різною та залежить, у першу чергу, від якості та стабільності параметрів елементної бази ВК КВС. При обмеженому фінансуванні при побудові ВК КВС виникає проблемне питання раціонального розподілу фінансового ресурсу між витратами на запас точності та витратами на покращення надійності елементної бази ВК КВС для зменшення швидкості зміни контрольних параметрів внаслідок деградації матеріалів радіоелементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поняття метрологічної надійності (МН) запропоновано у роботі А.Е. Фрідмана [7]. Залежність запасу точності ЗВТ і МН розглянуто у [8–9], але не було визначено та описано аналітичними залежностями показники точності та МН ЗВТ, що не дозволило сформулювати та вирішити завдання раціонального розподілу фінансового ресурсу при побудові ЗВТ між точністю та МН.

Мета статті – розробка методу розподілу витрат на забезпечення запасу точності та забезпечен-

ня надійності елементної бази ВК КВС з урахуванням характеру прискорення процесу старіння.

Виклад основного матеріалу

Процеси старіння матеріалів радіоелементів є причиною монотонного та незворотного зростання похибок ВК КВС, які відбуваються на молекулярному рівні і не залежать від того, чи працює КВС, чи знаходиться на зберіганні. Тому поняття “напрацювання у включеному стані” не є критерієм для оцінки втрати ресурсу для ВК КВС, оскільки темпи старіння однакові як при включеному, так і у вимкненому стані при зберіганні [3; 9]. Тобто, основним фактором, що визначає старіння ВК КВС, є календарний час з моменту виготовлення КВС.

Виробники при побудові ВК КВС для забезпечення визначеного часу метрологічної справності (часу напрацювання до метрологічної відмови) проектує ВК КВС з підвищеним відносно закріпленого у нормативно-конструкторській документації рівнем точності складових ВК КВС – ЗВТ для більшого “запасу точності на старіння”. Основним параметром, що визначає метрологічну справність ВК на протязі часу експлуатації КВС і що практично має можливість забезпечити виробник КВС, є величина запасу фактичного значення похибки відносно до її нормативного значення (запас точності на старіння) при побудові ВК КВС.

Поступове витрачання цього “запасу точності на старіння” і забезпечує довготривалу метрологічну справність ВК КВС. На практиці виробники забезпечують мінімум двохкратний запас нормованої границі похибки ВК КВС порівняно з її граничним значенням, що залежить від мінімального рівня достовірності визначення ТС ЗКР (забезпечення надлишкової фактичної точності ВК КВС порівняно з нормованою, що визначена у нормативній документації). Метою забезпечення вищезазначеного “запасу точності на старіння” є гарантування необхідного ресурсу – напрацювання до метрологічної відмови ВК КВС.

Наприклад, якщо у нормативно-технічній документації вимагається клас точності ЗВТ у складі ВК КВС як 0,3, то виробник забезпечує фактичний клас точності як 0,15. Але є також і “зворотня сторона”: побудова ЗВТ з занадто високим класом точності вимагає додаткових витрат. Час, протягом якого буде витрачено початковий запас точності ВК КВС, визначається як величиною цього запасу, так і швидкістю його витрати. Ця швидкість залежить від надійності (якості) елементної бази, матеріалів і технології виготовлення ВК КВС. Зменшення швидкості втрачання запасу точності призводить до збільшення часу напрацювання до метрологічної відмови ВК КВС (основного показника метрологічної надійності ВК КВС).

За визначенням, що наведено у [7], метрологічна надійність ЗВТ є властивістю зберігати нормовані значення метрологічних характеристик (МХ) протягом визначеного часу при нормальних умовах експлуатації. Основним показником МН є час метрологічної справності, протягом якого виконується вищезазначена вимога, та характеризується інтенсивністю метрологічних відмов, ймовірністю безвідмовної роботи або напрацюванням до метрологічної відмови. Час метрологічної справності ВК КВС може забезпечуватися двома способами: забезпеченням достатнього запасу точності та зменшенням швидкості витрати запасу точності за рахунок вдалих схемотехнічних рішень, вибору раціональних параметрів РЕА та режимів їх роботи, вдосконалення технології виготовлення, вибором надійної елементної бази з меншим дрейфом параметрів, введенням надлишковості (резервування) як на рівні всього ВК КВС, так і окремих вузлів і елементів [9].

Старіння матеріалів елементної бази ВК КВС є основною причиною підвищення частоти метрологічних відмов, та, відповідно, витрат на ремонт та метрологічне обслуговування ВК КВС. Експериментальні дослідження цього процесу старіння для отримання достовірних даних необхідно проводити тривалий час, що триватиме роками та десятиліттями. Тому на практиці отримали широке розповсюдження математичні методи прогнозування темпу старіння матеріалів елементної бази. Теоретично рівень надійності елементної бази можна визначити вимірюванням змін МХ на початковому етапі експлуатації ВК КВС і побудовою математичної моделі, яка екстраполює отримані результати вимірювань у майбутнє на визначений інтервал часу. Інструментом побудови математичних моделей процесу старіння матеріалів елементної бази є теорія ймовірності та випадкових процесів.

Оцінювання часу метрологічної справності ЗВТ зручно характеризувати запасом МН [7], який включає до себе запас точності, поступове витрачання якого забезпечує на період експлуатації метрологічну справність ВК КВС, та швидкість втрачання цього запасу точності, що визначається рівнем надійності елементної бази.

На рис. 1 наведений графік зростання похибки γ , яка пропорційна зменшенню запасу точності на старіння протягом міжповірного інтервалу ЗВТ (ВК КВС) з різними рівнями початкової точності та надійності елементної бази.

Наведена похибка ЗВТ визначається як $\gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} 100\%$, де x_N – нормоване значення величини (параметра);

Δ – абсолютна похибка ($\Delta = x - x_g$, різниця між справжнім значенням величини та результатом вимірювання).

На рис. 1 γ_{II} позначений початковий рівень похибки ЗВТ, який збільшується з часом при експлуатації ЗВТ з визначеним кроком γ_K .

Введемо поняття “запас точності на старіння” (γ_{3T}), який визначається виразом:

$$\gamma_{3T} = \gamma_{GP} - \gamma_{II}, \quad (1)$$

де γ_{II} – початковий рівень похибки;

γ_{GP} – граничний рівень похибки.

Рис. 1. Зростання похибки вимірювальних каналів КВС з різними рівнями початкової точності та швидкості її зміни (надійності елементної бази)
Джерело: розроблено авторами.

Лінією 1 на рис. 1 зображена зміна похибки базового ЗВТ № 1 (для спрощення – у лінійному вигляді). Якщо після ремонту не забезпечений достатній запас точності на старіння, то ремонт ВК КВС потрібно виконувати щорік, що значно збільшує витрати на технічне обслуговування та ремонт [10].

Ламана лінія 2 на рис. 1 відповідає зміні похибки ЗВТ № 2, коли після кожної метрологічної відмови виконується ремонт ВК КВС та його похибка зменшується до початкового значення (γ_{II}). За міжремонтний період $T_{pi} = t_{pi} - t_{p,i-1}$ похибка ВК γ_{II} збільшується на γ_K (збільшення похибки на крок відносно γ_{II}). Лінія 3 на рис. 1 ілюструє експлуатацію без ремонтів ЗВТ № 3, у якого запас точності менше запасу точності ЗВТ № 1 на величину γ_K , внаслідок чого час напрацювання до метрологічної відмови ВК КВС (до досягнення граничного рівня похибки γ_{GP} , яка нормована у конструкторській документації на ВК КВС, за якої вже не забезпечується достовірне визначення ТС ЗКР) зменшується на t_p (при однаковому рівні надійності елементної бази ЗВТ № 1 та ЗВТ № 3). Лінія 4 на рис. 1 відповідає експлуатації без ремонтів ЗВТ № 4, у якого запас точності дорівнює запасу точності ЗВТ № 1, але

ЗВТ № 4 має більшу надійність елементної бази, внаслідок чого час напрацювання до метрологічної відмови ВК КВС збільшується на t_p .

За відсутності ремонтів (лінія 1 на рис. 1) похибка ВК КВС зростає безперервно за виразом:

$$\gamma(t) = \gamma_{II}(t) + n\gamma_K,$$

де n – кількість ремонтів.

При цьому частота метрологічних відмов $\varpi_{MB} = 1/T_p$ є незмінною протягом усього часу експлуатації ВК КВС, якщо зростання $\gamma(t)$ є лінійним.

На практиці характер метрологічного старіння має нелінійний характер, що розглянуто у [9]. Для високотехнологічних (високоточних) ВК КВС характерне позитивне значення прискорення старіння, їх висока початкова точність швидко знижується через низьку надійність елементної бази. Для ВК КВС цього типу підвищення часу напрацювання до метрологічної відмови досягається за рахунок запасу точності більшою ціною, ніж відповідним підвищенням надійності (меншою дисперсією та дрейфом параметрів радіоелементів) елементної бази ВК КВС. Виникає завдання знаходження раціонального компромісу при розподілі ресурсу на забезпечення запасу початкової точності ВК КВС та на забезпечення надійності (якості) елементної бази ВК КВС, від якої залежить швидкість витрачання запасу початкової точності ВК КВС, при обмежених сумарних витратах на ці складові.

При розподілі обмеженого ресурсу на забезпечення запасу початкової точності та на забезпечення надійності (якості) елементної бази ВК КВС необхідно враховувати різну ціну ВК КВС з позитивним та негативним прискоренням старіння при максимізації часу напрацювання до метрологічної відмови. Виробнику економічно невигідно допускати зниження запасу похибки ВК КВС з позитивним прискоренням процесу старіння і, навпаки, занижувати показники надійності елементної бази ВК КВС з негативним прискоренням процесу старіння.

МХ $y(t)$ ВК КВС дрейфує за виразом [10]:

$$y(t) = m_y(t) \pm k\sigma_y(t), \quad (2)$$

де k – коефіцієнт, що обирається з урахуванням закону розподілу МХ;

$m_y(t)$ – математичне очікування МХ ВК КВС;

$\sigma_y(t)$ – середнє квадратичне відхилення МХ.

Прогнозування дрейфу МХ ВК КВС дозволяє визначити з довірчою ймовірністю $P_{\text{дмв}}$ час появи метрологічної відмови $t_{\text{мв}}$. Величина інтервалу часу $(0, t_{\text{мв}})$ є напрацюванням до метрологічної відмови ВК КВС $T_{\text{мв}}$, що є показником запасу МН та

визначає час роботи ВК КВС без метрологічних відмов. Запас точності на старіння γ_{3T} ВК КВС, залежно від швидкості його зміни (що залежить від нахилу кривій) та характеру зміни (прискорення або уповільнення – $\frac{d\gamma(t)}{dt} > 0$ або $\frac{d\gamma(t)}{dt} < 0$), може бути знайдений за виразом:

$$\gamma_{3T} = \gamma_{GP} - k_H \gamma_P, \quad (3)$$

де k_H – коефіцієнт, що залежить від надійності (якості) елементної бази та характеризує швидкість втрачання запасу точності на старіння.

Чим більший запас точності, тим більший час напрацювання до метрологічної відмови T_{MB} при однаковій швидкості зростання похибки. Функції $m_y(t)$ і $y(t)$, що отримані при прогнозуванні МХ ВК КВС, визначають час напрацювання до метрологічної відмови T_{MB} , який можливо збільшити шляхом збільшення початкового рівня точності ВК КВС, або надійності елементної бази. При цьому значення початкового рівня точності $m_y(0)$ (відповідно, запасу точності ВК КВС також) для збільшення напрацювання до метрологічної відмови визначаються залежно від характеру прискорення зростання похибки.

Як було визначено, швидкість зростання похибки ВК КВС залежить від надійності та якості елементної бази, яка визначає технічні та техніко-економічні показники РЕА. Питання вибору компонентів елементної бази, а також схемотехнічне, конструктивне та технологічне виконання ВК КВС мають велике практичне значення, особливо при побудові РЕА на базі великої номенклатури радіоелементів.

До поняття “надійність елементної бази” також можна віднести використання технологічних прийомів, наприклад: термостабілізацію окремих вузлів або усього ВК, застосування екранів, фільтрів і спеціальних ланцюгів для усунення похибок через вплив електромагнітних полів, застосування стабілізованих джерел живлення, штучне старіння РЕА для стабілізації їх параметрів та ін. Крім того, слід враховувати, що як вартість забезпечення запасу точності ВК КВС, так і вартість забезпечення надійності елементної бази, як правило, зростає за експоненціальним законом [11–12].

Графоаналітичний метод компромісного розподілу витрат між на забезпечення запасу точності та надійності (якості) елементної бази залежно від характеру прискорення процесу старіння, складається з трьох етапів.

1 етап. Визначення прискорення зростання похибки ВК КВС за інформацією про дрейф МХ аналогічних ВК та побудова математичної моделі, яка екстраполює на відрізки часу у майбутньому зна-

чення МХ (прогнозує похибку ВК КВС у визначений час у майбутньому). Це дозволяє прогнозувати (математично або методами імітаційного моделювання) характер зростання похибки ВК КВС та побудувати функцію дрейфу МХ (2) ВК КВС, що досліджується. Спрощенням при формалізації методу є те, що серед загальних витрат на побудову ВК КВС (C_Σ), які є обмеженими, розглядаються тільки складові витрат, які пов'язані з забезпеченням запасу точності та забезпеченням запасу надійності елементної бази. Але при побудові ВК КВС існують також інші види витрат, які вважаємо константою ($C_{in} = const$) та не розглядаємо при оптимізації розподілу витрат на дві вищезазначені складові: $C_\Sigma = C_{3H} + C_{3T} + C_{in}$.

Загальні витрати на побудову ВК КВС є обмеженими: $C_\Sigma \leq C_\Sigma^*$, де C_Σ^* – ресурс, що є у розпорядженні виробника для побудови КВС.

2 етап. Визначення оцінки часу напрацювання до метрологічної відмови T_{MB}^* , яка залежить від табличного значення напрацювання до метрологічної відмови T_{MB} , від витрат на забезпечення запасу точності C_{3T} ВК КВС. Функція цієї залежності має складний характер, але її можна апроксимувати виразом [10]:

$$T_{MBT}^* \approx T_{MB} + T_{MB} \cdot \ln \left(\frac{C_{3T}}{C_{in}} \right). \quad (4)$$

На рис. 2 показано, що для високотехнологічних високоточних ВК КВС (наприклад, побудованих на базі цифрових ЗВТ) з позитивним прискоренням старіння характерно більш швидке збільшення часу напрацювання до метрологічної відмови за рахунок запасу точності зі збільшенням вартості, чим для ВК КВС нескладної конструкції (наприклад, на базі електровимірювальних ЗВТ).

Рис. 2. Залежність оцінки часу напрацювання до метрологічної відмови T_{MB}^* від витрат на забезпечення запасу точності C_{3T} ВК КВС:

- 1 – для ВК з негативним прискоренням старіння;
 - 2 – для ВК з позитивним прискоренням старіння
- Джерело: розроблено авторами.

Це пояснюється тим, що усі нескладні та дешеві способи збільшення точності вже застосовані та вичерпані, і подальше збільшення запасу точності (відповідно, і часу напрацювання до метрологічної відмови) може бути досягнуто лише застосуванням складних та дорогих способів забезпечення точності. З подальшим збільшенням витрат приріст запасу точності ВК КВС є незначним, тобто подальше використання ресурсів для “придбання” запасу точності ВК КВС є все менш ефективним.

Визначення залежності оцінки часу напрацювання до метрологічної відмови від витрат на забезпечення запасу надійності елементної бази C_{3H} ВК КВС, яку також можна апроксимувати залежністю:

$$T_{MBH}^* \approx T_{MB} \left[1 + \ln \left(\frac{C_H}{C_{in}} \right) \right]. \quad (5)$$

На рис. 3 показано, що для ВК КВС нескладної конструкції є більш вигідною “купівля” (збільшення) запасу точності, що має більший ефект (збільшення часу напрацювання до метрологічної відмови), порівняно з “придбанням” більш надійної та якісної елементної бази. Тому що усі ефективні способи збільшення запасу надійності (якості) елементної бази для зменшення швидкості втрачання запасу точності вже вичерпані та подальше збільшення запасу надійності (якості) елементної бази може бути досягнуто більш дорогою ціною порівняно з фінансуванням “придбання” запасу точності.

Рис. 3. Залежність оцінки часу напрацювання до метрологічної відмови T_{MB}^* від витрат на забезпечення запасу надійності елементної бази C_{3H} :

- 1 – для ВК з негативним прискоренням старіння;
2 – для ВК з позитивним прискоренням старіння
Джерело: розроблено авторами.

Форма та нахил кривих на рис. 2 та рис. 3 залежить від величини негативного (позитивного) прискорення старіння, що визначається експериментально або методами імітаційного моделювання. Згідно [3], для ЗВТ з позитивним прискоренням старіння подвійне підвищення запасу надійності елементної бази обходиться у 1,4 рази дорожче, ніж

таке саме підвищення запасу точності, а для ЗВТ з негативним прискоренням старіння – майже у 1,6 разів дешевше.

3 етап. Визначення раціонального розподілу витрат (загального фінансового ресурсу) між витратами на забезпечення запасу точності та витратами на забезпечення запасу надійності (якості) елементної бази ВК КВС з урахуванням залежності цих витрат від характеру прискорення процесу старіння ВК КВС.

Критерієм оптимізації при вирішенні завдання розподілу витрат на забезпечення запасу точності та витрат на забезпечення запасу надійності є максимум цільової функції:

$$T_{MB}^* \approx f[(C_{\Sigma} - C_{3H})] \rightarrow \max. \quad (6)$$

На рис. 4 показано, що для залежності, що описується кривою 2 (оцінка часу напрацювання до метрологічної відмови залежить від витрат на забезпечення запасу як надійності елементної бази, так і точності за однаковим законом), раціональним компромісом є розподіл наявного ресурсу у рівних пропорціях на забезпечення запасу точності та на забезпечення запасу надійності (якості) елементної бази ВК КВС (відповідно 50% та 50% від загальної суми витрат на ці складові при побудові ВК КВС).

Для залежності, що описується кривою 1, оптимальним компромісом є розподіл, за яким витрати на запас точності C_{3T} складають чверть від загальних витрат. Для залежності, що описується кривою 3, оптимальним компромісом є розподіл, за яким витрати на запас точності C_{3T} складають три чверті від загальних витрат.

Рис. 4. Приклад залежності оцінки часу напрацювання до метрологічної відмови від розподілу витрат (на забезпечення запасу точності і на забезпечення запасу надійності елементної бази вимірювальних каналів контрольно-випробувальної станції)
Джерело: розроблено авторами.

На практиці знаходження строго оптимального рішення задачі розподілу ресурсу між витратами на забезпечення запасу точності та запасу надійності

(якості) елементної бази ВК КВС є складною задачею у зв'язку з дискретністю як вартості елементної бази, так і витрат на підвищення запасу точності (класу точності) ЗВТ та іншими факторами.

Це рішення є лише раціональним, тобто таким, яке задовольняє виробника та є найкращим у певних умовах.

Знаходження раціональної пропорції витрат для забезпечення запасу точності та запасу надійності елементної бази ВК КВС залежно від характеру прискорення процесу старіння ВК КВС дозволяє зробити практичний висновок.

Так, забезпечення максимального напрацювання до метрологічної відмови ВК КВС при обмеженні загальних витрат економічно доцільно досягти для нескладних магнітоелектричних вимірювальних приладів за рахунок збільшення початкового рівня точності, а для цифрових вимірювальних приладів – за рахунок покращення надійності (якості) елементної бази.

Висновки

Таким чином, у статті розроблено графоаналітичний метод компромісного розподілу витрат між витратами на забезпечення запасу точності та витратами на забезпечення надійності (якості) елементної бази залежно від характеру прискорення процесу старіння, що дозволяє при обмежених витратах забезпечити максимальний час напрацювання до метрологічної відмови ВК КВС.

Перспективою подальших досліджень є знаходження уточнених залежностей часу напрацювання до метрологічної відмови від витрат на забезпечення запасу точності ВК КВС та від витрат на збільшення надійності елементної бази. Ці дослідження мають бути експериментально підтверджені практикою виробництва під час побудови перспективної універсальної автоматизованої КВС за базово-модульним принципом.

Список літератури

1. Проектирование зенитных управляемых ракет / И.И. Архангельский, П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, В.Г. Светлов и др. – М.: МАИ, 2001. – 732 с.
2. Страхов А.Ф. Автоматизированные измерительные комплексы / А.Ф. Страхов. – М.: Энергоиздат, 1990. – 216 с.
3. Герасимов С.В. Метрологічна надійність засобів вимірювальної техніки / С.В. Герасимов, В.Є. Козлов, Ю.П. Шамаєв. – Х.: ХВУ, 2006. – 175 с.
4. Сергеев А.Г. Метрология / А.Г. Сергеев. – М.: ЛОГОС, 2009. – 247 с.
5. Clarke F. Functional analysis, Calculus of Variations and Optimal Control / F. Clarke. – New York: Springer, 2013. – 606 p.
6. O'Neill C.R. Time-domain training signals comparison for computational fluid dynamics based aerodynamic identification / C.R. O'Neill // Journal of Aircraft. – 2005. – No. 2(42). – P. 421-428.
7. Фридман А.Э. Метрологическая надежность средств измерений и определение межповерочных интервалов / А.Э. Фридман // Метрология. – 1991. – № 9. – С. 52-61.
8. Герасимов С.В. Методика обґрунтування номенклатури параметрів контролю радіотехнічних систем і призначення їх допустимих відхилень / С.В. Герасимов, В.В. Грідіна // Системи обробки інформації. – 2018. – № 2(153). – С. 159-164. <https://10.30748/soi.2018.153.20>.
9. Яковлев М.Ю. Развитие теории метрологической надежности средств измерений военной техники / М.Ю. Яковлев. – М.: Машиностроение, 2011. – 425 с.
10. Прібілев Ю.Б. Метод вибору оптимального співвідношення між початковим рівнем точності та запасом метрологічної надійності вимірювальних каналів контрольно-випробувальної станції при обмеженні вартості / Ю.Б. Прібілев // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2019. – № 2(35). – С. 127-132.
11. Новицкий П.В. Динамика погрешностей средств измерений / П.В. Новицкий, И.Л. Зограф, В.С. Лабунец // Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
12. Rybin Yu. Measuring Signal Generators. Theory and Design / Yu. Rybin. – Dordrecht, London, New York: Springer, 2014. – 488 p.
12. Rybin Yu. Measuring Signal Generators / Yu. Rybin. – Theory and Design, London, New York: Springer, 2014. – 488 p.

Надійшла до редколегії 29.07.2020

Схвалена до друку 15.09.2020

Відомості про авторів:

Прібілев Юрій Борисович
кандидат технічних наук
доцент
Національного університету оборони
України ім. І. Черняхівського,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1941-3561>

Information about the authors:

Yurii Prubylev
Candidate of Technical Sciences
Associate Professor
of Ivan Cherniakhovsky
National Defense University of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1941-3561>

Герасимов Сергій Вікторович
доктор технічних наук професор
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1810-0387>

Sergey Herasimov
Doctor of Technical Sciences Professor
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1810-0387>

Борисенко Максим Вячеславович
кандидат технічних наук
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6997-6429>

Maksym Borysenko
Candidate of Technical Sciences
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6997-6429>

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОМПРОМИСНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАПАСА ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ КОНТРОЛЬНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Ю.Б. Прибылев, С.В. Герасимов, М.В. Борисенко

В статье разработан графоаналитический метод компромиссного распределения расходов на обеспечение запаса точности и надежности элементной базы в зависимости от характера ускорения процесса старения измерительных каналов контрольно-испытательной станции. Показано влияние роста погрешности измерительных каналов контрольно-испытательной станции с различными уровнями начальной точности и скорости изменения на время метрологической исправности таких каналов. Рассмотрено использование технологических приемов для обеспечения надежности элементной базы измерительных каналов и уменьшение скорости ущерба для запаса точности. Предложено при ограниченном финансировании построения измерительных каналов для решения задачи рационального распределения расходов между затратами на обеспечение запаса точности и расходами на обеспечение надежности элементной базы использовать графоаналитический метод.

Ключевые слова: зенитные ракетные комплексы, зенитная управляемая ракета, контрольно-испытательная станция, измерительный канал, метрологическая надежность, погрешность.

GRAPH-ANALYTICAL METHOD OF COMPROMISE DISTRIBUTION OF COSTS FOR THE PRECISION OF ACCURACY AND FOR THE RELIABILITY OF THE ELEMENTARY BASE OF MEASURING CHANNELS OF TEST STATION

Yu. Prubylev, S. Herasimov, M. Borysenko

The article develops a graph-analytical method of compromise distribution of costs to ensure the margin of accuracy as well as the reliability of the element base depending on the nature of the acceleration of the aging process. It is shown how the increase of the error of the measuring channels of the test station with different levels of initial accuracy and speed of its change (reliability of the element base) affects the time of metrological serviceability. There were also investigated methods of achievement by the manufacturer of long-term metrological serviceability of measuring channels of test station. The first way is to provide the required level of "aging margin" in the form of a sufficient value of the margin of the normalized margin of error in relation to its actual value. The second method is the selection of high-quality (reliable) radio elements of the measuring channels of the test station, which provides a slowdown in the drift of parameters over time. It is noted that these methods of ensuring the metrological serviceability of measuring channels have a different price depending on the nature of the acceleration of the aging process, which is determined experimentally or by simulation methods. The use of technological methods is considered, which ensures the reliability of the element base of measuring channels and reduce the rate of loss of accuracy. It is proposed to solve the problem of rational distribution of costs between the costs of ensuring the margin of accuracy and the costs of ensuring the reliability (quality) of the element base by the graph-analytical method with limited funding for the construction of measuring channels of test station. A limitation of the developed method will be to consider only the components related to the provision of the accuracy margin and the reliability margin of the element base among the total costs, whereas other costs are considered constant.

Keywords: anti-aircraft missile system; anti-aircraft guided missile; test station; measuring channel; metrological reliability; error.