

Павло Вікторович Опенько

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗРАЗКІВ ЗЕНІТНОГО РАКЕТНОГО ОЗБРОЄННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

Постановка проблеми

Світовий досвід експлуатації та тенденції розвитку систем озброєння та військової техніки (ОВТ) протиповітряної та протикосмічної оборони (ППО/ПКО) на прикладі зенітних ракетних комплексів (ЗРК), зміна умов ведення збройного протиборства під час збройних конфліктів останніх років свідчить про підвищення вимог до рівня справності та технічної готовності систем озброєння до бойового застосування. При цьому однією із найважливіших складових проблеми бойової готовності та подальшого безвідмовного функціонування ОВТ ППО/ПКО залишається забезпечення ефективності бойового застосування ЗРК за рахунок підтримання (або досягнення) визначеного рівня технічної готовності під час експлуатації.

Існуюча на даний час планово-попереджувальна (регламентована) стратегія технічної експлуатації і ремонту (ТЕ і Р) орієнтована на високовитратні регламентовані технічні обслуговування (ТО) і капітальні ремонти. При цьому ефективність регламентованої стратегії ТЕ і Р (за наробітком або за календарною тривалістю), яка передбачає виконання профілактичних робіт певних обсягів через раніше заплановані інтервали часу або наробітку на всьому однотипному парку ЗРК незалежно від стану їх систем і виробів, залежить від того, в якому ступені вона враховує рівень надійності, закладений в зразки ОВТ під час їх виробництва, фізико-географічні умови та інтенсивність їх експлуатації.

В результаті огляду світових тенденцій розвитку стратегій ТЕ і Р встановлено, що більш тісний зв'язок між станом об'єкта та станом процесу його експлуатації забезпечує стратегія ТЕ і Р за станом. Характерною особливістю стратегії ТЕ і Р за станом є те, що в процесі експлуатації контролюється стан конкретного об'єкту для своєчасного прийняття рішень про необхідність проведення ремонту і його об'єм. При цьому ЗРК можуть експлуатуватися без встановлення міжремонтних ресурсів (термінів служби) і підлягають ремонту по досягненню ними відповідного виду граничного стану.

Ефективність реалізації стратегії ТЕ і Р за станом значною мірою визначається своєчасним

виявленням моментів переходу радіоелектронних засобів (РЕЗ) ЗРК у граничний стан. В процесі експлуатації надійність РЕЗ конкретних зразків зенітного ракетного озброєння (ЗРО) погіршується, оскільки за характером основних деградаційних процесів, які приводять виріб до граничного стану, РЕЗ зразків ЗРО відносяться до старіючих виробів. Тому вихід величини контрольованого показника надійності за межі встановлених значень є однією з ознак граничного стану РЕЗ зразків ЗРО.

За відсутності змін в конструкції РЕЗ зразків ЗРО показники ремонтпридатності можна вважати незалежними від тривалості експлуатації. Отже, при прогнозуванні граничного стану РЕЗ зразків ЗРО необхідно досліджувати зміну безвідмовності, а оцінки показників довговічності конкретного РЕЗ зразка ЗРО визначати з використанням встановлених закономірностей індивідуальної зміни величин показників безвідмовності (ПБ).

Аналіз літератури

В науково-технічній літературі сукупність методів оцінки показників довговічності розподілена на параметричні і непараметричні [1-7]. При цьому параметричні методи застосовуються в припущенні, що вид функції розподілу наробітку (тривалість експлуатації) об'єктів до ресурсної відмови (граничного стану) відомий заздалегідь, а її параметри встановлюються за достатньо великим обсягом результатів експлуатаційних спостережень однорідних об'єктів. Навпаки, непараметричні методи можуть застосовуватись в припущенні невідомого вигляду функції розподілу наробітку до ресурсної відмови.

Такі методи оцінки показників довговічності зразків ЗРО і їх РЕЗ розроблені стосовно регламентованої стратегії ТЕ і Р і застосовуються для парку однотипних РЕЗ та недостатньо повно враховують індивідуальні особливості умов і режимів експлуатації РЕЗ відповідних зразків ЗРО. Крім того, на практиці оцінка показників довговічності РЕЗ зразків ЗРО за результатами організації і проведення ресурсних випробувань або експлуатаційних спостережень ускладнена через те, що відсутня статистика моментів переходів зразків ЗРО і їх РЕЗ до граничного стану

і, як наслідок, відсутня вибірка значень ресурсів і термінів служби зразків ЗРО, що не дозволяє встановлювати закони розподілу цих випадкових величин. Встановлення законів розподілу ресурсів і термінів служби зразків ЗРО розрахунково-експериментальним методом за відомими законами розподілу ресурсів і термінів служби комплектуючих виробів, визначеними за результатами експлуатаційних спостережень, призводить до великих похибок через неможливість обліку умов і режимів експлуатації конкретних комплектуючих виробів у складі радіоелектронної апаратури зразків ЗРО, їх РЕЗ і їх складових частин.

Основна частина

З метою індивідуального вирішення завдання оцінки показників довговічності РЕЗ зразків ЗРО при переведенні на експлуатацію за технічним станом (ЕТС) з урахуванням їх фактичного технічного стану і надійності необхідно оцінювати показники їх довговічності з урахуванням конкретних режимів і умов експлуатації, міри впливу цих режимів і умов експлуатації на стан РЕЗ. Це оцінювання проводиться, як правило, з використанням залежностей зміни ПБ від параметрів, що характеризують режими експлуатації, таких, як тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарний пробіг базових шасі тощо. При цьому результати експлуатаційних спостережень, накопичені на сукупності інтервалів експлуатації фіксованої тривалості, у вигляді сукупності оцінок ПБ розглядаються як вихідні дані для побудови залежностей зміни величин ПБ в процесі експлуатації для прогнозування значень на майбутні інтервали експлуатації і, відповідно, оцінювання показників довговічності РЕЗ зразків ЗРО при ЕТС.

Математичним апаратом, який може бути використаний для вирішення даного завдання в умовах нестабільності вимірювань з метою найбільш повного врахування впливу факторів на зміну ПБ, є індуктивний підхід як метод прямої побудови моделей за даними спостережень [8-10].

Індуктивні методи дають можливість автоматично знаходити залежності, які приховано у вибірці початкових даних.

Індуктивне моделювання базується на переборі множини моделей-претендентів за зовнішніми критеріями селекції і розв'язує задачу структурно-параметричної ідентифікації. Одним з найбільш ефективних методів моделювання за експериментальними даними в умовах неповноти інформації є метод групового урахування аргументів (МГУА) [8-13]. На відміну від регресійного аналізу, де структура моделі задається, в МГУА структура оптимальної моделі та її параметри знаходяться за допомогою самоорганізації моделей, тобто випробування багатьох моделей-претендентів за зовнішніми критеріями селекції.

В роботі [14] проводилось порівняння ефективності застосування регресійного аналізу та МГУА для прогнозування економічних процесів.

Виконано порівняння прогнозуючих властивостей моделей, побудованих на основі методу найменших квадратів (МНК) та МГУА на прикладах побудови моделей процесів зміни обсягу виробництва легкої промисловості та інфляції.

В роботі показано, що прогнозуючі властивості моделі МГУА значно вищі, причому модель оптимальної складності значно простіша, ніж модель, побудована за МНК. Тобто фактори, що не ввійшли в модель МГУА, є не просто зайвими та малоінформативними, а навіть "шкідливими" в умовах наявної короткої вибірки даних.

Отримані результати показують, що регресійні моделі, навіть якщо вони за статистичними характеристиками виявляються значущими, мало придатні для цілей прогнозування. Моделі, побудовані за алгоритмами МГУА автоматично, за інформацією вибірки даних, знаходять істотні внутрішні закономірності об'єкта моделювання, тому їхня прогнозна ефективність значно вища.

МГУА побудовано за принципами самоорганізації, в основі яких лежить два основних принципи: при поступовому ускладненні структури значення зовнішніх критеріїв спочатку зменшуються, а потім – збільшуються, тобто існує мінімум; тільки зовнішні критерії, розраховані на даних, що не використовувались для побудови моделей, проходять через мінімум.

Тому в МГУА застосовується поділ не менше ніж на дві незалежні вибірки даних [8]. Одна з них використовується для оцінки параметрів, а друга – для вибору оптимальної моделі. Застосовувати тільки один критерій принципово не можна, оскільки може виникнути ситуація: "чим складніша модель, тим вона точніша".

Всі критерії, які використовуються в МГУА, засновані на розбитті вибірки.

Особливістю МГУА є забезпечення "свободи вибору". При поступовому ускладненні структури моделей на кожному ряді з найкращих за зовнішнім критерієм моделей відбирається не одна, а декілька найкращих моделей [8].

Найбільш відомим серед методів індуктивного моделювання є комбінаторний алгоритм МГУА [8,14-17]. Це метод, який не потребує доведення збіжності, оскільки виконує повний перебір усіх можливих моделей-претендентів.

МГУА розроблено для розв'язання задач моделювання складних систем, прогнозування, ідентифікації та апроксимації багатфакторних систем, діагностики, розпізнавання образів та кластеризації даних.

При цьому для використання цього математичного апарату доцільно прийняти наступні припущення:

1. Зміною величини контрольованих (оцінюваних) ПБ за фіксовану тривалість інтервалу експлуатації можна нехтувати, оскільки ця тривалість неспіврозмірна в порівнянні з величиною призначеного ресурсу (терміну служби) об'єкта. При цьому їх безвідмовність в результаті відновлення працездатності в межах

інтервалу експлуатації фіксованої тривалості практично не змінюється (тобто відновлення безвідмовності РЕЗ зразків ЗРО після відмов передбачаються мінімальними).

2. На сукупності інтервалів експлуатації фіксованої тривалості величини контрольованих (оцінюваних) ПБ змінюються істотно, причому характер цієї зміни заздалегідь невідомий і повинен встановлюватися у вигляді моделей їх зміни залежно від тривалості експлуатації і інших чинників по накопичених значеннях оцінок ПБ.

Сукупність параметрів, що характеризують режими експлуатації РЕЗ зразків ЗРО з урахуванням форм і механізмів реєстрації результатів експлуатаційних спостережень вибираємо наступною: тривалість експлуатації T_e , сумарний наробіток T , сумарний пробіг базового шасі S , сумарна кількість увімкнень N . Залежність величини ПБ від значень параметрів, що характеризують режими експлуатації, стосовно конкретного РЕЗ зразка ЗРО, може бути визначена математичною моделлю, що описує процес зміни безвідмовності РЕЗ зразка ЗРО.

В загальному вигляді процес зміни технічного стану (зміни ПБ) зразків ЗРО при ЕТС може бути представлений у вигляді часового ряду (Y_t), що складається з впорядкованих в часі наборів вимірювань тих або інших характеристик досліджуваного процесу.

$$y_t = x_t + \xi_t \quad (1)$$

де x_t - детермінована компонента процесу;

ξ_t - стохастична компонента процесу.

При цьому детермінована компонента (тренд) характеризує існуючу динаміку розвитку процесу в цілому, а стохастична компонента відображає випадкові коливання (шуми) процесу.

Наявність детермінованої складової пояснюється процесами деградації, зношування і старіння зразків ЗРО при ЕТС, обумовленими витратою ресурсів, передбаченою нормативно експлуатаційною документацією, впливом кліматичних і інших чинників, а також виконаними заходами з технічного обслуговування і ремонту. Стохастична компонента обумовлена помилками, що виникають під час вимірювання параметрів, відхиленнями у виборі початку відліку та іншими причинами.

Основою будь-якого прогнозу є деякий об'єм початкової інформації, наприклад, за час T_1 , протягом якого в дискретні моменти часу $t_i = t_0, t_n$ досліджуваній показник приймає випадкові значення $Y(t_i) = Y_0, Y_n$.

В припущенні щодо розподілу за нормальним законом відхилення контрольованого показника від загальної тенденції його зміни аналітичний вираз функції математичного очікування $M[Y(t)]$ контрольованого показника повинен в області T_1 задовольняти наступній умові:

$$\begin{cases} M[Y(t_0)] = Y(t_0); \\ M[Y(t_1)] = Y(t_1); \\ M[Y(t_2)] = Y(t_2); \\ \dots \\ M[Y(t_n)] = Y(t_n). \end{cases} \quad (2)$$

При цьому в подальшому шляхом формального і логічного аналізу процесу можемо стверджувати про збереження тенденції зміни показника $Y(t)$ і в області T_2 з деякою похибкою $\varepsilon(t)$, тобто показник набуває значення $M[Y(t_{n+1})] \pm \varepsilon(t_{n+1})$, $M[Y(t_{n+2})] \pm \varepsilon(t_{n+2})$ і так далі до моменту, коли функція $Y(t)$ досягне допустимого (граничного) значення:

$$M[Y(t_{n+j})] \pm \varepsilon(t_{n+j}) \geq Y_{\text{доп}} \quad (3)$$

При цьому визначення допустимого значення $Y_{\text{доп}}$ розглядається вторинним завданням, оскільки про пошук її рішення має сенс говорити у випадку вирішення завдання визначення регулярної складової компоненти та на її основі отримання коректного уявлення процесу зміни рівня надійності в часі.

Необхідно відмітити, що якщо закон розподілу контрольованого показника невідомий, то виникає завдання опису випадкового процесу і прогнозування його значень на інтервалі T_2 , яке може бути з успіхом вирішено шляхом застосування МГУА.

Таке завдання відповідно до МГУА може бути зведене до пошуку екстремуму деякого критерію CR на безлічі різних моделей F:

$$f^* = \arg \min_{f \in F} CR(f) \quad (4)$$

Очевидно, що (4) не містить вичерпного формулювання завдання, тому додатково необхідно:

задати вигляд і об'єм початкової інформації; вказати клас базисних функцій, з яких формується безліч F;

визначити спосіб генерації моделей f разом з методом оцінювання параметрів;

вибрати критерій порівняння моделей;

вказати метод мінімізації CR.

З метою уточнення постановки завдання введемо наступні припущення:

1. Процес характеризується m вхідними (незалежними) змінними $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$ і однією вихідною (залежною) змінною y , які пов'язані співвідношенням:

$$y_i = x_i \Theta + \xi_i, \quad (5)$$

де Θ - вектор m незалежних параметрів;

i - номер спостереження;

ξ_i - вектор реалізації випадкової величини (шуму).

2. Випадкова величина має наступні властивості:

$$E\xi_i = 0, E\xi_i \xi_i = \sigma^2, E\xi_i \xi_j = 0, i \neq j,$$

де σ^2 - кінцева невідома дисперсія при невідомій функції розподілу ξ_i ;

E - оператор математичного очікування.

3. Вважається заданою вибірка W, яка містить n точок спостережень, що створюють матрицю аргументів $X = \{x_{ij}, i = 1, n, j = 1, m\}$ та вектор зашумленої вихідної змінної $y = (y_1, \dots, y_n)^T$, причому $n \geq m$.

З урахуванням введених припущень завдання моделювання процесу полягає у формуванні деякої безлічі моделей різної структури:

$$y_f = f(x, q_f) \quad (6)$$

і відшуканні найкращої моделі за умови:

$$f^* = \arg \min_{f \in F} CR(y, f(x, \theta_f)) \quad (7)$$

Пошук прогнозних значень повинен вестися в області незміщених і ефективних оцінок, що з успіхом вирішується методом групового урахування аргументів.

Обчислення моделей процесу зміни рівня надійності озброєння ЗРВ, що характеризують процес зміни його технічного стану, здійснюється шляхом вирішення завдань виразу (4). Для цього необхідно проаналізувати процес моделювання за експериментальними даними з метою визначення основних його етапів стосовно методики прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) зразків ЗРО при ЕТС, що розробляється.

Як було встановлено, завдання моделювання полягає у виборі по заданому критерію найкращої моделі з деякої безлічі моделей. При цьому необхідно: задати вигляд і об'єм початкової інформації; вказати клас базисних функцій (операторів), з яких формується безліч моделей; визначити спосіб формування (генерації) структур моделей разом з методом оцінювання їх параметрів; вибрати зовнішній критерій порівняння моделей; вказати метод мінімізації критерію вибору моделі і процедуру оцінки адекватності. Таким чином, завдання оцінки рівня надійності комплексів ЗРО при ЕТС зводиться до пошуку функції опису випадкового процесу з незміщеними, достовірними параметрами і визначення її прогнозних значень. Рішенню цієї задачі присвячені наступні дослідження.

По вибірці спостережень змінних Y і X потрібно вибрати структуру f з деякого класу структур F, вважаючи, що $f \in F$, і оцінити значення параметра Θ . Модель досліджуваного процесу визначається у вигляді

$$y = f(x, \Theta) \quad (8)$$

причому y - скалярна вихідна змінна, x - векторна вхідна змінна. Вся апріорна інформація полягає в тому, що при деяких значеннях $x \in X$ ми спостерігаємо величину y, спотворену шумом.

Існує функція опису процесу зміни технічного стану (рівня надійності) зразків озброєння

$$y_i = f(x_{ij}) + \xi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

де x, y - елементи матриць X і Y відповідно;

ξ_i - випадкова помилка вимірювань величин.

При цьому y - досліджуємий ПБ РЕЗ зразків ЗРО, $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$ - результати експлуатаційних спостережень: тривалість експлуатації T_e , сумарний наробіток T, сумарний пробіг базового шасі S, сумарна кількість увімкнень N.

Початкові дані, отримані за наслідками підконтрольної експлуатації, можуть не мати додаткових відомостей про характеристики неконтрольованих збудень.

У розроблених алгоритмах МГУА використовуються одні і ті ж критерії селекції і однакові системи опорних функцій. Відмінність же алгоритмів моделювання визначається структурою генератора моделей, тобто схемою перебору повної або неповної безлічі часткових моделей, що ускладнюються, у вибраному базисі.

Під час розробки математичної моделі в розробленій частковій методиці реалізований блок формування поліноміальних опорних функцій.

Для вимірюваних значень експлуатаційних чинників x_1, \dots, x_m модельованого процесу і заданого ступеня полінома q число доданків g в повному поліномі ступеня q від m змінних визначається

виразом: $g = \prod_{j=1}^m \frac{q+j}{j}$. Відповідно, повний поліном

$$\text{має вигляд: } y = \sum_{u=1}^g a_u \prod_{j=1}^m x_j^{q_{uj}}.$$

Для формування ступенів аргументів організована процедура отримання послідовності m - розрядних чисел $q_u = (q_{u1}, \dots, q_{um})$ з підстановкою 1, 2, ... і так далі.

Так, для досліджуваних в ході дослідження ОВТ ЗРВ чотирьох аргументів ($m = 4$) і $q = 2$ отримана послідовність $g = 15$ чисел $q_u, u = 1, 15$:

0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 1100, 1010, 1001, 0110, 0101, 0011, 2000, 0200, 0020, 0002.

Блок перебору часткових моделей включає виконання наступних операцій: формування структури чергової часткової моделі; формування відповідної нормальної системи рівнянь, оцінка коефіцієнтів моделі.

Формування структур часткових моделей в комбінаторному алгоритмі здійснюється за допомогою двійкового структурного вектора $d = (d_1, d_2, \dots, d_g)$: якщо елемент d цього вектора приймає значення 1, то відповідний u-й аргумент включається в часткову модель, якщо 0 - не включається ($u = 1, g$).

Зміна стану вектора d організовується розміщенням в ньому одиниць: спочатку однієї (всього отримано $C_g^1 = g$ варіантів), потім дві (всього $C_g^2 = 1/2 g(g+1)$ варіантів) і так далі. Загальне число різних структур

складе: $p_g = \sum_{u=1}^g C_g^u = 2^g - 1$, тобто повний перебір.

Зовнішні критерії відбору математичних моделей процесів призначені для вирішення завдання (7) і засновані на розділенні вибірки початкових даних на дві і більше частини.

Зовнішніми називають критерії, які розраховуються на новій „зовнішній” інформації, яка не використовувалась для побудови моделі. До таких критеріїв належать: критерій регулярності, критерій незміщеності (мінімуму зсуву), балансу змінних, передбачуваної здібності, абсолютного-перешкодостійкий та інші. Всі вони засновані на використанні інформації, нової в порівнянні з тією, яка застосовується для відшукування початкових параметрів.

Серед зовнішніх критеріїв МГУА виділяють такі групи критеріїв [8]: критерії точності, які виражають помилку моделі, що розраховується на різних частинах вибірки; критерії узгодженості, які є мірою близькості оцінок, отриманих на різних частинах вибірки; комбіновані критерії є згортокою декількох критеріїв, наприклад, з метою вибору моделі, яка одночасно була б і найточнішою, і найменш зміщеною.

Послідовністю критеріїв називається кілька критеріїв, що застосовуються послідовно один за одним.

Вибірка даних ділиться при цьому, як правило, на три підвибірки, що не перетинаються: А, В, С, де А – навчальна, В – перевірна, С – екзаменаційна підвибірки; позначимо W - робоча вибірка, причому $A \cup B = W$. Розглянемо докладніше основні критерії МГУА.

Критерій точності. Найбільш уживаним серед критеріїв точності є критерій регулярності, який розраховується для заданої складності моделі S:

$$AR_B(s) = AR_{B|A}(s) = \|y_B - y_{B|A}\|^2 = \|y_B - X_B \theta_A\|^2,$$

$$AR_B(s) = AR_{B|A}(s) = \Delta^2(B) = \|Y_B - X_B \theta_A\|^2$$

де запис $AR_{B|A}(S)$ означає „помилка на В моделі складності S, коефіцієнти якої отримано на А“. Аналогічним чином може бути записаний критерій регулярності для моделей, отриманих на В:

$$AR_A(s) = AR_{A|B}(s) = \|y_A - y_{A|B}\|^2 = \|y_A - X_A \theta_B\|^2.$$

$$AR_A(s) = AR_{A|B}(s) = \Delta^2(A) = \|Y_A - X_A \theta_B\|^2$$

Надалі опустимо в формулах залежність від S, пам'ятаючи, що значення критеріїв розглядаються для конкретної складності S.

Критерій регулярності, розрахований на тій же вибірці, на якій отримана модель, є залишковою сумою квадратів (*RSS* – Residual Sum of Squares). Крім того, в якості критерію точності може бути застосований критерій стабільності [2]:

$$AS = AR_{W|A} + AR_{W|B} = \|y_W - X_W \theta_A\|^2 + \|y_W - X_W \theta_B\|^2$$

Точність і незміщеність – це різні показники, одне не замінює інше, особливо при неточних або неповних даних. При повній відсутності шуму всі критерії вказують на фізичну модель і можна користуватися будь-яким критерієм (внутрішнім або зовнішнім). Загальноприйнятий підхід,

заснований на розрахунку точності моделі, ефективний тільки для переускладнених моделей, при наявності шуму в даних. Точність на такій вибірці даних зовсім не означає точності на наступній вибірці, тобто не забезпечує несуперечливості.

Критерій незміщеності (мінімуму зсуву, узгодженості). Критерії цієї групи відображають вимогу, щоб кращі моделі, отримані на А і В, мінімально відрізнялися. Мінімум незміщеності коефіцієнтів має вигляд:

$$CB = CB_{W|A,B} = n_{cm}^2 = \|X \theta_A - X \theta_B\|^2.$$

Критерії групи узгодженості є найбільш вагомими для вибору закономірностей, оскільки дозволяють обрати найменш суперечливі моделі. За наявності шуму в даних комп'ютер знаходить все більш прості структури оптимальних моделей.

Цілеспрямований пошук оптимальної структури значно полегшується, якщо, по-перше, виходячи з фізичних міркувань, клас структур буде обмежений і, по-друге, будуть застосовані відповідні критерії вибору. В [10] приведено, що найкращі результати показали критерії двох перших груп, та їх застосування виявилось, в основному, достатнім для вирішення завдань. Особливо результативно використання цих критеріїв, перш за все, у зв'язку з високим ступенем їх об'єктивності.

Критерій регулярності дозволяє отримати найбільш регулярне рішення, тобто вирішення мінімальної за змістом складності, малочутливе до невеликих змін початкових даних. Моделі, знайдені за мінімумом критерію регулярності, при високому рівні шумів є недостатньо точними, оскільки при збільшенні перешкод мінімум критерію регулярності зміщується у бік вибору простіших моделей, а при великій інтенсивності шумів найбільш кращими виявляються лінійні прогнозуючі моделі.

Таким чином, критерій регулярності несе в собі фізичний зміст, який полягає у тому, що він орієнтований на вибір моделі, яка буде найбільш точною на множині точок, що будуть отримані в найближчому майбутньому. Він застосовується для короткострокового прогнозування на один-два кроки вперед.

Критерій незміщеності (мінімуму зсуву) компенсує названі недоліки критерію регулярності і дозволяє забезпечити значну відмінність моделей, що отримуються при використанні різних частин таблиці початкових даних, що дозволяє говорити про зближення математичного уявлення фізичного змісту досліджуваних процесів зміни технічного стану зразків ЗРО при ЕТС. У разі відсутності зсуву, моделі, що отримуються на основі різних частин таблиці, повинні співпадати. Таким чином, критерій незміщеності дозволяє вирішити задачу зміни закону, який прихований в зашумлених експериментальних даних, тому рекомендується при рішенні задачі ідентифікації. Критерій:

регулярності – $\Delta^2(B)$ і незміщенності – n_{cm}^2 в найбільш загальному вигляді [9] можна записати:

$$\Delta^2(B) = \|Y_B - X_B \theta_A\|^2, \quad (10)$$

$$n_{cm}^2 = \|X \theta_A - X \theta_B\|^2, \quad (11)$$

де X, Y – матриці, що містять всю початкову інформацію;

X_A, X_B, Y_A, Y_B – матриці, відповідно $(n_A \times m), (n_B \times m), (n_A \times 1)$ і $(n_B \times 1)$; n_A, n_B натуральні числа, сума яких дорівнює n ;

A, B – множини, які згруповані на вибірках $(X_A; Y_A)$ і $(X_B; Y_B)$;

θ_A, θ_B – коефіцієнти, знайдені, відповідно, на множинах A, B .

Визначимо умови рішення задачі для системи рівнянь вигляду $Y = aX$, де a – вектор параметрів, відповідних обраній структурі, розраховується методом найменших квадратів [9] і має вигляд: $a = (X^T X)^{-1} X^T Y$, де X^T – транспонована матриця.

Критерій регулярності для оцінки структури моделі може бути визначений [9] формулою:

$$\Delta^2(B) = (Y_B^* - Y_B)^T (Y_B^* - Y_B), \quad (12)$$

де Y_B^* – вектор оцінок, отриманих методом найменших квадратів на Y_A і X_A , тобто з урахуванням попередніх виразів:

$$Y_B^* = X_B (X_A^T X_A)^{-1} X_A^T Y_A$$

Критерій незміщенності, як правило, задається формулою:

$$n_{cm}^2 = (Y_A^* - Y_B^{**})^T (Y_A^* - Y_B^{**}), \quad (13)$$

де $Y_{A,B}^{**} = X (X_{A,B}^T X_{A,B})^{-1} X_{A,B}^T Y_{A,B}$.

Таке наведення критерію незміщенності еквівалентне [9] наведенню критерію незміщенності за коефіцієнтами, що задається формулою: $n_{cm}^2 = (a_A - a_B)^T X^T X (a_A - a_B)$

Сукупність значень оцінок показників надійності на різних фіксованих інтервалах експлуатації розподіляється на навчальну і тестову. В алгоритмах МГУА цей розподіл, як правило, проводиться послідовно або "за дисперсією", який базується на ранжуванні спостережень за їхнім розсіюванням навколо середньої точки. Проте, ці способи розподілу не можуть бути застосовані при прогнозуванні зміни рівня надійності зразків ЗРО, оскільки параметри, що характеризують режими експлуатації, мають зростаючий у часі характер і найбільш важливими є останні спостереження, які відображують останні тенденції у зміні безвідмовності. Тому бажано було б, щоб ці останні спостереження були представлені в обох вибірках.

Для пасивного експерименту, яким експлуатація РЕЗ ЗРК, оптимальним є такий розподіл на вибірки A і B при якому матриці X_A та X_B , які відповідають експлуатаційним

спостереженням навчальної і перевіркової вибірок, при $\text{rank } X_A = \text{rank } X_B = m$ задовольняють умові квадратичної залежності

$$X_A^T X_A = \rho_B^2 X_B^T X_B, \quad \rho_B^2 \neq 0. \quad (14)$$

Частковим випадком такого розподілу є лінійно залежний (ρ_B^2 – пропорційний) розподіл.

Викладені принципи використані як початкові в алгоритмі пошуку оптимальних математичних моделей при рішенні задачі оцінки зміни технічного стану (рівня надійності) озброєння.

Рішення задачі вибору структури моделі зазвичай ускладнюється невеликим об'ємом інформації, яка міститься у матрицях X, Y . Тому для підвищення якості прогнозу та отримання обґрунтованого рішення щодо вигляду отриманої моделі виникає необхідність застосування модифікації критерію регулярності, або критерію передбачувальної здібності.

Для цього здійснюється розбиття вхідної та вихідної вибірок на три підвибірки відповідно:

$$X = \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_W \\ X_C \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_A \\ Y_B \\ Y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_W \\ Y_C \end{bmatrix}, \quad (15)$$

Відповідно, критерій передбачувальної здібності використовує середньоквадратичну похибку, розраховану для вибірки Y при параметрах, отриманих на окремій екзаменаційній вибірці C , яка не застосовувалась для знаходження коефіцієнтів θ та під час вибору моделей-претендентів, та має вигляд:

$$\Delta^2(Y_C) = \|Y - X \theta_C\|^2, \quad (16)$$

де X, Y – матриці, що містять всю початкову інформацію;

θ_C – коефіцієнт, знайдений на множині C .

При реалізації прогнозів важливо встановити відповідність обраного критерію якості отриманих прогнозних результатів. У алгоритмі оцінки зміни рівня надійності зразків ЗРО реалізується не двохкритеріальний, а послідовний відбір: спочатку обираються F_1 моделей за критерієм незміщенності, а потім F_2 кращих – за будь-яким критерієм точності. Таке послідовне застосування критеріїв підвищує ефективність моделювання, зокрема перешкодостійкість. При цьому уникають проблеми нормування.

Найбільш прийнятними для вирішення завдання побудови моделей процесу зміни рівня надійності зразків ЗРО при ЕТС є застосування комбінованого критерію: критерій незміщенності для вибору F_1 моделей, які достатньо апробовані при вирішенні завдань подібного класу, та комбінованого критерію: критерій незміщенності та передбачувальної здібності для вибору F_2 моделей, що дозволяє успішно вирішувати завдання середньострокового та довгострокового прогнозування в визначених умовах [18,19].

Вирішуючи задачу (7), на основі достовірних даних випробувань на надійність проводиться пошук математичної моделі вигляду:

$$Y = f(X) \quad (17)$$

і оцінка технічної довговічності зразків озброєння після досягнення ним мінімально допустимого рівня безвідмовності: $Y \geq Y_{\text{пред}}$

Процес побудови моделей припиняється при відшуканні моделі вигляду :

$$\begin{cases} Y = f(X); \\ \sigma = \min; \\ \Delta^2(Y \setminus C) = \min; \\ Y \geq Y_{\text{пред}}; \end{cases} \quad (18)$$

де σ - середньоквадратична помилка;

$\Delta^2(Y \setminus C)$ - значення критерію передбачувальної здібності.

Алгоритм моделювання процесу зміни технічного стану (рівня надійності) зразків зенітного ракетного озброєння при експлуатації за технічним станом, в основу якого покладений комбінаторний алгоритм МГУА, програмно реалізований Г.О. Івахненко [19], і доопрацьований в плані вибору кращої прогнозуючої моделі за критерієм $\Delta^2(Y \setminus C) \rightarrow \min$, представлений на рис. 1.

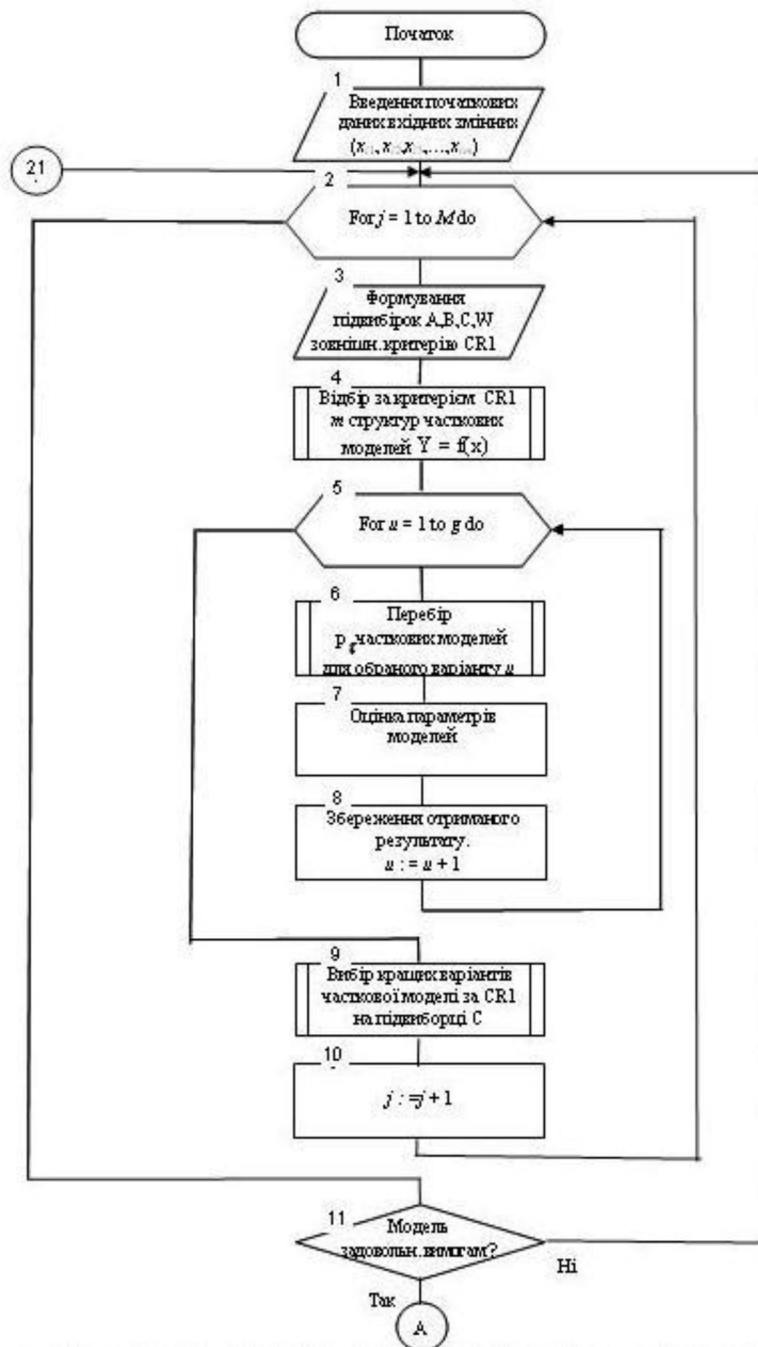


Рис. 1. Алгоритм моделювання процесу зміни технічного стану (рівня надійності) зразків зенітного ракетного озброєння при експлуатації за технічним станом (початок)

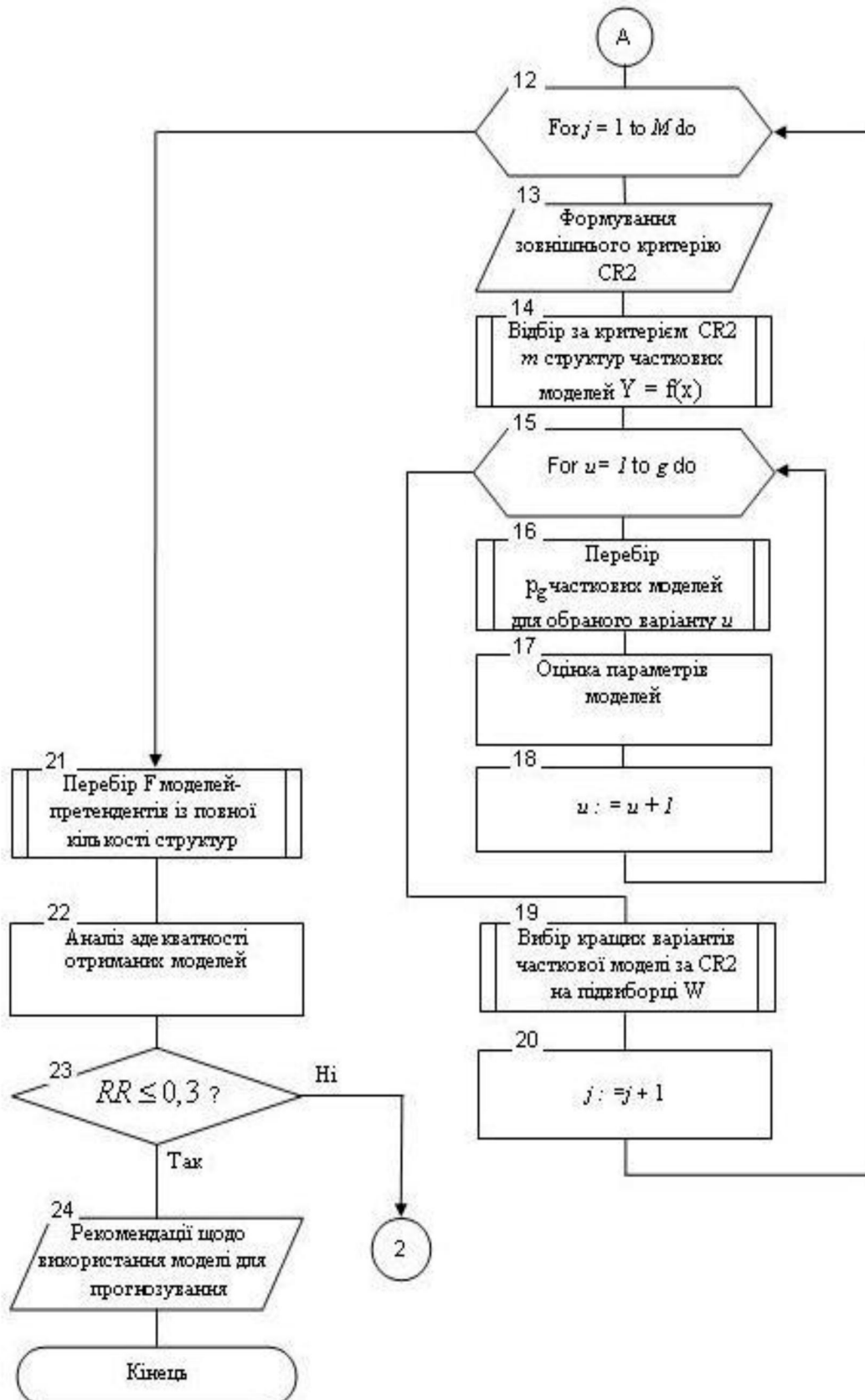


Рис. 1. Алгоритм моделювання процесу зміни технічного стану (рівня надійності) зразків зенітного ракетного озброєння при експлуатації за технічним станом (закінчення)

Питання перевірки адекватності моделей, що отримуються в результаті рішення задачі (7), розглядається по-різному в умовах застосування того або іншого підходу, і, в основному, визначається типом критерію, використовуваного

при порівнянні моделей. Наприклад, в рамках класичного підходу є добре розроблені процедури оцінки достовірності побудованих моделей із застосуванням апарату перевірки гіпотез про значущість регресійної залежності в цілому (за

допомогою F-статистик) і кожного коефіцієнта регресії окремо (з допомогою t-статистик) [20,21]. Таким чином, окрім специфічних засобів, характерних для тих або інших методів, в рамках як класичного, так і сучасного підходів для перевірки прогнозуючих властивостей моделей активно застосовується прийом “перехресного підтвердження”, що зводиться до розбиття вибірки. Саме на цьому прийомі принципово засновані методи МГУА [22]. Зокрема, у застосованих алгоритмах МГУА вибірка ділиться на три частини: на першій (навчальній) обчислюються параметри моделей, що генеруються, на другій (перевірочній) вони порівнюються за точністю з відбором однієї або декількох кращих, на третій, незалежній (екзаменаційній), перевіряється якість відібраних моделей в режимі прогнозування. Отже, отримана модель характеризується трьома значеннями помилок (на кожній з трьох частин вибірки), по яких можна зробити достатньо обґрунтований висновок про її якість: якщо всі вони близькі між собою, то модель не суперечлива (адекватна по структурі):

$$RR = \frac{\sum_{i=NA+NB+1}^N (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=NA+NB+1}^N (y_i - y_E)^2}, \quad (20)$$

де y_i - реальні значення функції на экзаменаційній послідовності довжиною NC , тобто від $N - (NA + NB)$ до N ;

y_i^* - значення функції, що прогножуються та визначені за допомогою математичної моделі на экзаменаційній послідовності;

y_E - середнє значення функції на экзаменаційній послідовності.

Ступінь адекватності моделі вважається високою, якщо значення RR менше 0,3 [9]. Відмінністю приведеного показника якості моделі (18) є оперування зовнішньою інформацією по відношенню до даних, які використовувались при отриманні математичної моделі.

Крім того, оцінка адекватності моделі досліджуваному процесу проводиться за допомогою критерію передбачуваної здібності $\Delta^2(YC)$. В результаті зі всієї безлічі моделей вибирається та, яка має кращі прогнозуючі властивості.

Висновки

Таким чином, запропонована математична модель процесу зміни технічного стану зразків зенітного ракетного озброєння під час експлуатації за технічним станом є логічних продовженням відомих аналогічних процедур, розглянутих в [1,2,6,7], та, на відміну від них, враховує використання в якості вихідних даних нерівноточні результати оцінювання контрольованого показника надійності за результатами експлуатаційних спостережень.

Використання замість парних лінійних регресійних моделей зміни показника надійності від тривалості експлуатації (сумарного наробітку) запропонованої математичної моделі, що описує залежність зміни показника надійності від сукупності параметрів, які характеризують режими експлуатації об'єктів, дає можливість забезпечення більш повного урахування специфічних особливостей РЕЗ зразків ЗРО.

Література

1. Гаскаров Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалевский. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с. 2. ГОСТ 27.302-86. Надежность в технике. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 20 с. 3. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / [Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др.] – М.: Машиностроение, 1989. – Т.6: Экспериментальная обработка и испытания. – 376 с. 4. РД 50-490-84. Методические указания. Техническая диагностика. Прогнозирование остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 19 с. 5. Садыхов Г.С. Показатели остаточного ресурса и его свойства / Г.С. Садыхов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1985. – №4. – С.138-143. 6. Зубарев В.В. Математические методы оценки и прогнозирования технических показателей эксплуатационных свойств радиоэлектронных систем. / В.В.Зубарев, А.П. Ковтуненко, Л.Г. Раскин. – К.: Книжкове видавництво НАУ, 2005. – 184 с. 7. Раскин Л.Г. Задача оценки и прогнозирования показателей технического состояния с учетом условий эксплуатации / Л.Г. Раскин, И.О. Кириченко. // Методы решения задач эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры. – Харьков: ВИРТА ПВО, 1977. – С.32 – 36. 8. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования. / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 216 с. 9. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с. 10. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей. / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер. – Киев: Техника, 1985. – 221 с. 11. Ivakhnenko A.G. Heuristic Self-organization in Problems of Engineering Cybernetics. Pergamon PRESS / Ivakhnenko A.G. // Journal Automatica. – 1970. – №6. – P. 207-219. 12. Ivakhnenko A.G. Polynomial Theory of Complex Systems / Ivakhnenko A.G. // J. of IEEE Transactions on systems man and cybernetics. – 1971. – №4. – P. 364-378. 13. Madala H.R. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. / H.R. Madala, A.G. Ivakhnenko. – Boca Raton: CRC Press Inc., 1994. – 384 p. 14. Ивахненко А.Г. Метод группового учета аргументов - конкурент метода стохастической аппроксимации / Ивахненко А.Г. // Автоматика. – 1968. – №3. – С. 58-72. 15. Ивахненко Н.О. Комбинаторні алгоритми МГВА, в яких екзамени на регулярність піддіються як „симетричні”, так і „несиметричні” поліноми / Н.О.Ивахненко, М.З. Кваско // Автоматика. – 1972. – №5. – С. 42-48. 16. Степашко В.С. Комбинаторный алгоритм МГУА для структурной идентификации объектов управления с применением различных

критериев селекции / Степашко В.С. // К. : РФАП, 1977. – С. 14. **17. Степашко В.С.** Комбинаторный алгоритм МГУА с оптимальной схемой перебора моделей / Степашко В.С. // Автоматика. – 1981. – №3.– С. 31–36. **18. Ивахненко Г.А.** Применение прогнозирующих алгоритмов МГУА для решения маркетинговых задач / Ивахненко Г.А. // Проблемы управления и информатики. – 2008. – №2.– С. 140–152. **19. Справочник** по типовым программам моделирования/ А.Г. Ивахненко, Ю.В. Коппа, В.С.

Степашко и др. Под ред. А.Г. Ивахненко. – Киев: Техника, 1980. – 184 с. **20. Вучков И.** Прикладной линейный регрессионный анализ. / И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с. **21. Демиденко Е.З.** Линейная и нелинейная регрессии. / Демиденко Е.З. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с. **22. Ивахненко А.Г.** Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. / Ивахненко А.Г. – Киев: Наук. думка, 1982. – 296 с.

В статье приведена процедура разработки математической модели процесса изменения технического состояния образцов зенитного ракетного вооружения при эксплуатации по техническому состоянию. Данная процедура основана на использовании метода группового учета аргументов и учитывает возможность использования в качестве исходных данных оценок показателей безотказности, полученных по неравноточным результатам эксплуатационных наблюдений и позволяет более полно учитывать специфические особенности использования радиоэлектронных образцов зенитного ракетного вооружения.

Ключевые слова: метод группового учета аргументов, образец зенитного ракетного вооружения, эксплуатация по техническому состоянию.

The development procedure of the mathematical model of antiaircraft missile armament samples technical condition change when operating by a technical condition is presented in the article. The given procedure is based on using the Group Method of Data Handling and takes into account the possibility to use as starting data the no-failure operation indexes estimations, obtained by heteroscedastical outcomes of in-operation observations. The proposed procedure allows to take into account more full the specific features of use of antiaircraft missile armament radioelectronic means use as well.

Key words: Group Method of Data Handling, sample of antiaircraft missile armament, operation on a technical condition.