

Б.М. Ланецький, І.В. Коваль, В.П. Попов

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

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЗБЕРЕЖУВАНOSTІ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЗЕНІТНИХ КЕРОВАНИХ РАКЕТ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОДОВЖЕННЯ ЇХ ПРИЗНАЧЕНИХ ПОКАЗНИКІВ

Для вирішення завдань продовження призначених показників зенітних керованих ракет (ЗКР) необхідно проводити оцінювання показників їх залишкової збережуваності. У зв'язку з цим у статті запропонований метод оцінювання показників збережуваності бортового обладнання ЗКР, який містить процедуру двоетапного оцінювання емпіричної функції розподілу (ЕФР) тривалостей зберігання виробів до відмови. На першому етапі здійснюється попереднє оцінювання ЕФР з використанням непараметричних методів статистики. Для попереднього оцінювання ЕФР використовуються результати експлуатаційних випробувань бортового обладнання ЗКР та апріорна інформація про імовірність безвідмовної роботи на момент початку експлуатації, перших років експлуатації та граничних термінах служби. На другому етапі здійснюється апостеріорне оцінювання ЕФР на основі відновленої залежності накопиченої інтенсивності відмов від тривалості зберігання. Особливістю запропонованого методу є те, що можливість застосування того чи іншого непараметричного методу статистики для побудови попередньої ЕФР оцінюється на основі порівняння точності оцінок показників залишкової збережуваності, які необхідні для вирішення завдання продовження призначених показників ЗКР. Отримані точкові та інтервальні оцінки середнього залишкового терміну служби ЗКР для п'яти варіантів вихідних даних, які відрізняються величиною коефіцієнту варіації та тривалістю спостережень. Показано, що метод послідовного переходу до нової системи координат у порівнянні з іншими непараметричними методами дозволяє отримати більш прийнятні оцінки середнього залишкового терміну служби ЗКР.

Ключові слова: продовження призначених показників, експлуатаційні випробування, середній залишковий термін зберігання, емпірична функція розподілу, непараметричні методи статистики апріорна інформація, точкові та інтервальні оцінки.

Вступ

Постановка проблеми. Одним з основних завдань, які вирішуються при продовженні призначених показників (ПП) ЗКР, є оцінювання і прогнозування показників надійності як ЗКР в цілому, так і їхніх складових частин (далі – виробів). При цьому для прийняття рішення щодо продовження ПП ЗКР на інтервал часу, що продовжується, потрібно мати оцінки показників збережуваності цих виробів при їх тривалому зберіганні. Оцінювання цих показників здійснюється на підставі інформації, яка отримана за час проведення експлуатаційних випробувань виробів в цілому та їхніх складових частин в рамках виконання робіт з продовження призначених показників. В [1] зазначено, що за результатами проведення експлуатаційних випробувань формується цензурована вибірка [2–4], яка містить реалізації випадкових тривалостей зберігання виробів до відмови (ТЗВВ) і тривалості зберігання виробів до цензурування. Обсяг цієї вибірки залежить від кількості виробів, з якими проводяться експлуатаційні випробування, тривалості зберігання та проведення експлуатаційних випробувань і є малим.

Закон розподілу ТЗВВ невідомий, тому для оцінювання відповідних показників надійності доцільно використовувати непараметричні методи статистики [4–8].

В [1] запропонований бутстреп-метод оцінювання показників надійності бортового обладнання ЗКР з використанням апріорної інформації для вирішення завдань продовження призначених показників. Цей метод використовує дані експлуатаційних випробувань та апріорну інформацію про збережуваність виробів, яка є в технічних умовах і конструкторській документації на вироби і дозволяє отримувати оцінки показників надійності з прийнятною достовірністю для прийняття рішення про продовження призначених показників ЗКР. При цьому попередня оцінка ЕФР здійснюється непараметричним методом статистики у відповідності з [7] з урахуванням апріорних даних, далі ЕФР апроксимується поліномом, який використовується для розрахунку показника збережуваності. Але при цьому апроксимація ЕФР поліномом не описує достатньо точно реальну функцію розподілу. Відомо, що для оцінки показників надійності не відновлювальних об'єктів можна використовувати ведучу функцію

потоку відмов, яка є позитивною, неспадною. При її побудові можна враховувати знання щодо збережуваності об'єкту, а саме, що об'єкт є не відновлювальний, а відмови з часом накопичуються.

У зв'язку з цим на даний час актуальним є розробка методу, який враховує ці закономірності. При цьому представляє інтерес провести порівняння точності оцінювання показника надійності при попередньому оцінюванні ЕФР різними непараметричними методами статистики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінюванню показників надійності за цензурованими вибірками присвячено багато робіт. Найбільш повною є робота [3]. Однак в ній, в основному, розглядаються асимптотичні властивості оцінок, у той час як у практиці оцінювання обсяги вибірок обмежені і важливо знати точності оцінювання показників надійності непараметричними методами при різних співвідношеннях повних і неповних реалізацій у вибірці кінцевого об'єму.

В роботі [8] проведено співставлення непараметричних методів Нельсона і Джонсона, в [4] – методів Нельсона, Джонсона, Каплана і Мейера, послідовного переходу до нової системи координат, але при цьому проаналізована точність оцінювання тільки середнього наробітку до відмови.

Для вирішення завдань продовження призначених показників ЗКР представляє інтерес провести аналіз точності цих методів при оцінці показників залишкової збережуваності.

Метою статті є розробка методу оцінювання показників збережуваності бортового обладнання ЗКР для вирішення завдання продовження призначених показників.

Виклад основного матеріалу

При проведенні робіт з продовження призначених показників виробів досліджуються величини “усічених середніх залишкових термінів зберігання” $T_i(\tau)$ парку виробів, що розглядаються на інтервалі зберігання $(\tau, \tau+t)$ [4]. В [1] показано, що за умови використання даних експлуатаційних випробувань та апріорної інформації щодо збережуваності виробів оцінюється “середній залишковий термін зберігання” – $T(\tau)$. При цьому співвідношення для оцінювання $T(\tau)$ має вид:

$$\hat{T}(\tau) = \frac{1}{\hat{P}_{30}(\tau)} \int_{\tau}^{\infty} \hat{P}_{30}(t) dt, \quad (1)$$

де $\hat{P}_{30}(t) = 1 - \hat{F}_{30}(t)$, $\hat{F}_{30}(t)$ – апостеріорна оцінка функції розподілу ТЗВВ.

Метод, який пропонується для побудови $\hat{F}_{30}(t)$, складається з двох етапів. На першому етапі здійснюється попереднє оцінювання ЕФР з використанням непараметричних методів статистики. На другому етапі здійснюється апостеріорне оцінювання ЕФР на основі відновленої залежності накопиченої інтенсивності відмов від тривалості зберігання. При цьому для підвищення статистичної достовірності отриманих результатів оцінювання цієї залежності здійснюється шляхом використання бутстреп-методу з використанням апріорної інформації, який запропонований в [1].

Попереднє оцінювання $\hat{F}_{30}(t)$ здійснюється за емпіричними даними, які отримані на інтервалі спостереження, та даними моделювання ТЗВВ за рівномірним законом на інтервалі до початку експлуатаційних випробувань. Це моделювання здійснюється з використанням апріорних даних щодо безвідмовності виробів, які наведені в конструкторській документації. Ці дані отримуються з технічних умов на виробі та конструкторської документації і представлені у вигляді імовірності безвідмовного зберігання виробів $P_{30}(t_i)$ на перших роках експлуатації та на граничних термінах зберігання виробів.

Побудова апостеріорної ЕФР на другому етапі здійснюється на основі побудови залежності накопиченої інтенсивності відмов від тривалості зберігання. Ця залежність отримується шляхом перерахунку значень попередньо оціненої ЕФР за формулою:

$$\Lambda_i(t_i) = -\ln(1 - F_{30}(t_i)), \quad (2)$$

та апріорних даних $P_{30}(t_i)$ у відповідні значення $\Lambda_i(t_i)$ за формулою:

$$\Lambda_i(t_i) = -\ln(P_{30}(t_i)). \quad (3)$$

За даними $\Lambda_i(t_i)$ здійснюється побудова полінома, що апроксимує, який повинен бути представлений неспадною монотонною функцією випуклою донизу. Так, якщо $\Lambda_i(t_i)$ апроксимується поліномом 2-го ступеню $\Lambda(t) = a_2 t^2 + a_1 t$, то $a_2 > 0$. Поліному, який побудований, відповідає апостеріорна імовірність безвідмовного зберігання:

$$\hat{P}_{30}(t) = \exp[-\Lambda(t)]. \quad (4)$$

У відповідності з цим в роботі проведено дослідження з порівняння точності оцінювання показника типу “середній залишковий термін зберігання” – $T(\tau)$. Дослідження проводилося методом статистичних випробувань на ПЕОМ при числі випробувань $N=50$ для кожного сполучення повних і неповних реалізацій ТЗВВ. В якості розподілу для моделювання ТЗВВ обрано функцію розподілу (далі – ФР) Вейбула з коефіцієнтами варіації $v=0,67$; $v=0,52$; $v=0,38$; $v=0,28$; $v=0,22$, які наведені нижче в табл. 1.

За ФР Вейбула та співвідношенням (1) знаходиться величина $T(\tau)$, яка використовується в якості еталонної оцінки для порівняння точності непараметричних методів статистики, що розглядаються. Генерування реалізацій ТЗВВ здійснюється з використанням ФР Вейбула:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{a}\right)^b, \quad (5)$$

де a – параметр масштабу; b – параметр форми; t – календарна тривалість експлуатації виробів.

Реалізації ТЗВВ, які отримані з ФР Вейбула, використовуються в якості вихідних даних, які отримані за результатами експлуатаційних випробувань на інтервалах експлуатації ЗКР згідно програми робіт з продовження. Розкид значень ТЗВВ залежить від параметру форми b і задається значеннями коефіцієнту варіації v , які наведені в табл. 1. Параметри закону розподілу підібрані таким чином, що відповідає апріорній інформації та фізичним уявленням про можливі значення ТЗВВ на інтервалі часу від початку експлуатації виробів і до граничного терміну зберігання.

Для моделювання цензурованої вибірки обрана ситуація, яка має місце в практиці експлуатації ЗКР, а саме: її результати представлені планом експлуатаційних випробувань [NUT] [7].

Моделювання здійснюється за наступними вихідними даними (табл. 1):

– $N=50$ – число виробів для випробувань;

– $T=35(30)$ років – тривалість випробувань в залежності від варіанту завдання вихідних даних, яка визначається тривалістю зберігання ЗКР, які обрані для експлуатаційних випробувань;

– розглядаються різні інтервали спостережень при експлуатаційних випробуваннях:

а) інтервал спостереження знаходиться в межах 25–35 років – 1 варіант;

б) інтервал спостереження знаходиться в межах 25–30 років – 2 варіант;

– на початок спостережень (25 років) зафіксовано відмови (d_1) виробів, при цьому інформація про ТЗВВ на інтервалі експлуатації до 25 років відсутня;

– дані про кількість виробів, які відмовили впродовж інтервалу спостережень (d_2), які не відмовили до кінця спостережень (n), коефіцієнти варіації ТЗВВ (v), а також варіанти завдання вихідних даних наведені в табл. 1.

Для попереднього оцінювання ЕФР непараметричними методами статистики за вихідними даними, які наведені в табл. 1, та апріорною інформацією на інтервалі до початку спостережень (до 25 років) проводиться моделювання ТЗВВ у кількості d_1 за рівномірним законом розподілу, при якому здійснюється внесення мінімуму додаткової інформації у знання фактичного закону розподілу ТЗВВ.

Таблиця 1

Вихідні дані для моделювання

Коефіцієнт варіації	Варіанти вихідних даних	N	d_1	d_2	n
$v = 0,67$	1-й варіант	50	25	10	15
	2-й варіант	50	25	6	19
$v = 0,52$	1-й варіант	50	16	11	23
	2-й варіант	50	16	9	25
$v = 0,38$	1-й варіант	50	13	14	23
	2-й варіант	50	13	8	29
$v = 0,28$	1-й варіант	50	12	28	20
	2-й варіант	50	12	16	22
$v = 0,22$	1-й варіант	50	8	32	10
	2-й варіант	50	8	14	28

Попереднє оцінювання ЕФР здійснювалося одним з трьох непараметричних методів статистики: методом послідовного переходу до нової системи координат (МППНСК), Джонсона, Каплана і Мейєра. Апостеріорна оцінка ЕФР здійснюється у відповідності з формулами (2–4).

За умов моделювання вихідних даних у відповідності з законом Вейбула можна стверджувати, що дані експлуатаційних випробувань, які представляють собою однократно цензуровані малі вибірки, отримані з генеральної сукупності спостережень, і є репрезентативними вибірками вихідних спостережень. Тому ці вибірки можна використовувати для отримання іншої додаткової інформації щодо результатів спостережень виробів.

З метою підвищення статистичної достовірності отриманих результатів оцінювання $\Lambda(t)$ здійснюється шляхом використання бутстреп-методу з використанням апріорної інформації [1]. Для цього проводиться генерація бутстреп-вбірок псевдовипадкових ТЗВВ. Бутстреп-вбірки отримуються в результаті генерування значень $\hat{P}_{30}(t)$, пов'язаних з $\Lambda(t)$, що побудовані за вихідними даними табл. 1 та апріорною інформацією. $\Lambda(t)$ апроксимується поліномом третього ступеня. Для кожної бутстреп-вбірки отримується аналітична залежність з відповідними коефіцієнтами поліному, що описує $\hat{P}_{30}(t)$ та використовується для розрахунку точкової оцінки $\hat{T}(\tau)$ у відповідності з формулою (1), при цьому $\tau = 25$ років.

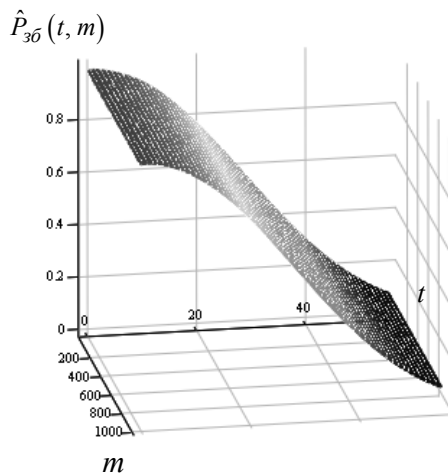
Для знаходження інтервальної оцінки з отриманої множини оцінок $\hat{T}(\tau)$ складається їх варіаційний ряд: $\hat{T}(\tau)_1 \leq \hat{T}(\tau)_2 \leq \dots \hat{T}(\tau)_i \leq \dots \hat{T}(\tau)_m$, за яким знаходиться інтервальна оцінка $\hat{T}(\tau)$.

Двосторонні довірчі межі $\hat{T}(\tau)_{\gamma_1}$ та $\hat{T}(\tau)_{\gamma_2}$ з рівнем довіри γ визначаються з варіаційного ряду, де

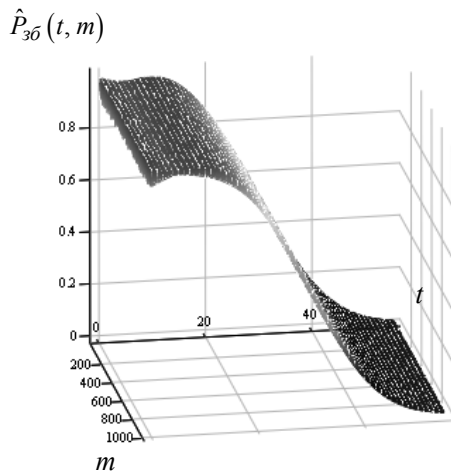
$$\gamma_1 = \left[\frac{m(1-\gamma)}{2} \right], \quad \gamma_2 = \left[\frac{m(1+\gamma)}{2} \right]. \quad (6)$$

Квадратні дужки означають цілу частину числа, що міститься в них. Для отримання оцінок з прийнятною точністю кількість модельованих вибірок “m” обирається з умови $m \geq \frac{10}{1-\gamma}$ [1].

На рис. 1, а, б в якості прикладів наведені графіки залежностей $\hat{P}_{3\sigma}(t)$, які отримані за результатами моделювання на основі варіантів вихідних даних табл. 1. Ці залежності використовуються для розрахунку $\hat{T}(\tau)$ при попередньому оцінюванні ЕФР методом послідовного переходу до нової системи координат.



а



б

Рис. 1. Графіки залежностей $\hat{P}_{3\sigma}(t, m)$ для МППНСК при різних варіантах завдання інтервалів спостереження і v :

а – $v=0,52$; варіант завдання інтервалу спостережень –1;
 б – $v=0,28$; варіант завдання інтервалу спостережень –2

У табл. 2 наведені точкові та інтервальні оцінки показника надійності “середній залишковий термін зберігання”, які отримані при різних непараметричних методах статистики та варіантах вихідних даних у відповідності з табл. 1. Результати оцінювання показують, що незалежно від коефіцієнту варіації оцінки $\hat{T}(\tau)$, отримані всіма методами, є близькими до еталонної.

Так для МППНСК при $v=0,52$; $v=0,38$ з довірчою імовірністю $\gamma=0,9$ еталонна оцінка з точністю до цілого значення лежить в межах довірчого інтервалу. При $v=0,67$; $v=0,28$; $v=0,22$ оцінки $\hat{T}(\tau)$ та їх довірчі інтервали не перевищують еталонної оцінки.

Для методів Джонсона та Каплана і Мейера при коефіцієнтах варіації $v=0,67$ еталонна оцінка з довірчою імовірністю $\gamma=0,9$ лежить в межах довірчого інтервалу, при $v=0,52$ та $v=0,38$ односторонні довірчі межі (ОНДМ) оцінок $\hat{T}(\tau)$ перевищують еталонну оцінку на 1 рік, при $v=0,28$ та $v=0,22$ ОНДМ оцінки $\hat{T}(\tau)$ не перевищують еталонної оцінки.

Таким чином, застосування для побудови ЕФР різних непараметричних методів статистики з використанням МППНСК дозволяє отримувати прийнятні за точністю та достовірністю оцінки показників середнього залишкового терміну зберігання.

Висновки

В статті розроблений метод оцінювання показників збережувачості бортового обладнання ЗКР для вирішення завдання продовження призначених показників. Наведені результати досліджень з порівняння точності оцінювання показників збережувачості бортового обладнання зенітних керованих ракет з використанням непараметричних методів статистики для вирішення завдання продовження їх призначених показників.

Пропонується:

- попереднє оцінювання ЕФР проводити методом послідовного переходу до нової системи координат за даними експлуатаційних випробувань та даними моделювання ТЗВВ за відомою інформацією про кількість відмов;

- побудову апостеріорної ЕФР здійснювати на основі відновленої залежності накопиченої інтенсивності відмов від тривалості зберігання;

- оцінювання показника залишкової збережувачості бортового обладнання здійснювати з використанням апостеріорної функції розподілу ТЗВВ.

Запропонований метод доцільно використовувати для оцінювання показників збережувачості у процесі проведення робіт з продовження призначених показників зенітних керованих ракет.

Точкові та інтервальні оцінки середнього залишкового терміну зберігання

Коеф. варіації	Вид оцінки	Еталонна оцінка $\hat{T}(\tau)$ (в роках)	Величини оцінок показника $\hat{T}(\tau)$ (в роках), які отримані при непараметричному методі статистики		
			МПННСК	Джонсона	Каплана і Мейера
v=0,67	варіант 1 (інтервал спостережень 25–35 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	17,2	16,3	17,3	17,4
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[15,8; 16,9]	[16,9; 17,7]	[16,9; 17,7]
	варіант 2 (інтервал спостережень 25–30 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	17,28	16,5	17,3	17,4
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[16,1; 17,0]	[17,0; 17,6]	[17,0; 17,7]
v=0,52	варіант 1 (інтервал спостережень 25–35 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	14,7	14,8	15,4	15,4
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[14,7; 15,0]	[15,2; 15,6]	[15,2; 15,6]
	варіант 2 (інтервал спостережень 25–30 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	14,7	14,8	15,3	15,3
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[14,7; 15,0]	[15,1; 15,5]	[15,2; 15,7]
v=0,38	варіант 1 (інтервал спостережень 25–35 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	12,3	12,9	13,1	13,1
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[12,8; 13,0]	[13,0; 13,3]	[12,9; 13,2]
	варіант 2 (інтервал спостережень 25–30 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	12,3	12,5	12,7	12,7
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[12,4; 12,6]	[12,6; 12,9]	[12,6; 12,9]
v=0,28	варіант 1 (інтервал спостережень 25–35 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	10,3	9,3	9,5	9,4
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[9,2; 9,5]	[9,2; 9,7]	[9,1; 9,6]
	варіант 2 (інтервал спостережень 25–30 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	10,3	10,1	9,9	9,9
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[9,9; 10,3]	[9,7; 10,1]	[9,7; 10,1]
v=0,22	варіант 1 (інтервал спостережень 25–35 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	9,4	8,1	8,3	8,2
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[8,0; 8,2]	[8,1; 8,4]	[8,1; 8,4]
	варіант 2 (інтервал спостережень 25–30 років)				
	Точкова ($\tau=25$ років)	9,4	9,0	8,8	8,8
	Інтервальна $[\underline{T}; \bar{T}]$		[8,7; 9,3]	[8,5; 9,3]	[8,5; 9,2]

Список літератури

1. Бутстреп-метод оцінювання показників надійності бортового обладнання зенітних керованих ракет з використанням апріорної інформації для вирішення завдань продовження призначених показників / Б.М. Ланецький, В.П. Деденок, І.В. Коваль, В.В. Лук'ячук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 3(32). – С. 25-31. <https://doi.org/10.30747/nitps.2018.32.04>.
2. Гаскаров Д.В. Малая выборка / Д.В. Гаскаров, В.И. Шаповалов. – М.: Статистика, 1978. – 249 с.
3. Скрипник В.М. Анализ надёжности технических систем по цензурированным выборкам / В.М. Скрипник, А.Е. Назин. – М.: Радио и связь, 1988. – 183 с.
4. Буртаев Ю.Ф. Статистический анализ надежности объектов по ограниченной информации / Ю.Ф. Буртаев, В.А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 240 с.
5. Tobias P.A. Applied Reliability. Third Edition / P.A. Tobias, D.C. Trindade. – Boca Raton: CRC Press, 2012. – 600 p.

6. Ohring M. Reliability and Failure of electronic Devices and Materials. Second Edition / M. Ohring, L. Kasprzak. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – 758 p.
7. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным: РД 50-690-89. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 132 с.
8. Аронов И.З. Оценка надёжности по результатам сокращённых испытаний / И.З. Аронов, Е.И. Бурдасов. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 184 с.
9. Розробка методичних рекомендацій з оцінювання показників збережуваності бортового обладнання зенітних керованих ракет при вирішенні завдань продовження призначених показників / Б.М. Ланецький, І.В. Коваль, А.А. Шоколовський, В.П. Попов, С.В. Селезнев, С.М. Донцов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 4(21). – С. 71-75.
10. Загальні науково-методичні положення з організації та проведення робіт з продовження призначених показників зенітних керованих ракет. Оцінка техніко-економічної ефективності робіт / Б.М. Ланецький, І.В. Коваль, В.В. Лук'ячук, В.В. Лісовенко, О.М. Доска // Озброєння та військова техніка. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2017. – Вип. 3(15). – С. 21-25.
11. Методика прогнозування стану парку зенітних керованих ракет при формуванні технічного завдання на проведення робіт з продовження призначених показників / Б.М. Ланецький, І.В. Коваль, С.В. Селезнев, В.П. Попов // Озброєння та військова техніка. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2018. – Вип. 3(19). – С. 26-31.
12. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многократного статистического анализа: Пер. с англ. / Б. Эфрон. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.
13. Jun Shao. The Jackknife and Bootstrap / Shao Jun, Tu Dongsheng. – Springer Science & Business Media, 2012. – 517 p.
14. Hall Peter. The Bootstrap and Edgeworth Expansion / Peter Hall. – Springer Science & Business Media, 2013. – 354 p.
15. Bootstrap method for missile precision evaluation under extreme small sample test / Zheng-dong Hu, Yuan Cao, Shifeng Zhang, Hong Cai // Coll. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China); Systems Engineering and Electronics. – 2008.
16. Антонов А.В. Бутстреп-метод оценки характеристик надежности восстанавливаемых объектов по специфическим данным об отказах / А.В. Антонов, С.В. Соколов, В.А. Чепурко // Информационные технологии. – 2012. – № 4. – С. 50-54.

References

1. Lanetskyi, B.M., Dedenok, V.P., Koval I.V. and Luk'ianchuk, V.V. (2018), "Butstrep-metod otsiniuvannya pokaznykiv nadiinosti bortovoho obladnannya zenitnykh kerovanykh raket z vykorystanniam apriornoj informatsii dlia vyrishennia zavdan prodovzhennia pryznachenyykh pokaznykiv" [Bootstrap method for evaluating the reliability indicators of the airborne equipment of the surface-to-air guided missiles with the use of the priority information for solving the problems of extension of the appointed indicators], *Science and technology of the Air Forces of Ukraine*, No. 3 (32), pp. 25-31. <https://doi.org/10.30747/nitps.2018.32.04>.
2. Gaskarov, D.V. and Shapovalov, V.I. (1978), "Malaya vyiborka" [Small sample], Statistics, Moscow, 249 p.
3. Skripnik, V.M. and Nazin, A.E. (1988), "Analiz nadyozhnosti tehnikeskikh sistem po tsenzurovannym vyiborkam" [Analysis of the reliability of technical systems for censored samples], Radio and Communications, Moscow, 183 p.
4. Burtaev, Yu.F. and Ostreikovskiy, V.A. (1995), "Statysticheskiy analiz nadezhnosti ob'ektov po ohranychennoi ynformatsyy" [Statistical analysis of the reliability of objects for limited information], Energatompublish, Moscow, 240 p.
5. Tobias, P.A. and Trindade, D.C. (2012), *Applied Reliability*, Third Edition, CRC Press, Boca Raton, 600 p.
6. Ohring, M. and Kasprzak, L. (2014), *Reliability and Failure of electronic Devices and Materials*, Second Edition, Elsevier, Amsterdam, 758 p.
7. State Committee of the USSR for Quality Management of Products and Standarts (1990), "Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost v tehnike. Metody otsenki pokazateley nadezhnosti po eksperimentalnyim dannym RD 50-690-89" [Methodical instructions. Reliability in technology. Methods for estimating reliability indicators from experimental data RD 50-690-89], Moscow, 132 p.
8. Aronov, Y.Z. and Burdasov, E.Y. (1987), "Otsenka nadezhnosti po rezultatam sokrashchennykh yspytaniy" [Reliability assessment based on reduced test results], Standards Publishing, Moscow, 184 p.
9. Lanetskyi, B.M., Koval, I.V., Shokolovskiy, A.A., Popov, V.P., Seleznev, S.V. and Dontsov, S.M. (2015), "Rozrobka metodychnykh rekomendatsii z otsiniuvannya pokaznykiv zberezhuvanosti bortovoho obladnannya zenitnykh kerovanykh raket pry vyrishenni zavdan prodovzhennia pryznachenyykh pokaznykiv" [Development of recommendations for the assessment of indicators showing state of electronic components in surface-to-air guided missile during their shelf life when solving the problems of extending the designated terms], *Science and technology of the Air Forces of Ukraine*, No. 4 (21), pp. 71-75.
10. Lanetskyi, B.M., Koval, I.V., Luk'ianchuk, V.V., Lisovenko, V.V. and Doska, O.M. (2017), "Zahal'ni naukovometodychni polozhennya z orhanizatsiyi ta provedennya robot z prodovzhennia pryznachenyykh pokaznykiv zenitnykh kerovanykh raket. Otsinka tekhniko-ekonomichnoyi efektyvnosti robot" [General scientific and methodical statements on organization and conducting works for extension assigned measures of surface-to-air missiles. Estimation of technical and economic efficiency of works], *Arms and military equipment*, No. 3(15), pp. 21-25.

11. Lanetskiy, B.M., Koval, I.V., Seleznov, S.V. and Popov, V.P. (2018), "Metodyka prohnozuvannya stanu parku zenytnykh kerovanykh raket pry formuvanni tekhnichnoho zavdannia na provedennia robiz z prodovzhennia pryznachenykh pokaznykiv" [Method for prediction the state of the surface-to-air missile park at the stage of formation of the requirements specification for conducting works on assigned measures extension], *Arms and military equipment*, No. 3(19), pp. 26-31.
12. Efron, B. (1988), "Netraditsionnyie metody mnogokratnogo statisticheskogo analiza" [Non-traditional methods of multiple statistical analysis], Finance and Statistics, Moscow, 263 p.
13. Jun Shao and Dongsheng Tu (2012), *The Jackknife and Bootstrap*, Springer Science & Business Media, 517 p.
14. Hall, Peter (2013), *The Bootstrap and Edgeworth Expansion*, Springer Science & Business Media, 354 p.
15. Zheng-dong Hu, Yuan Cao, Shi-feng Zhang and Hong Cai (2008), Bootstrap method for missile precision evaluation under extreme small sample test, *Coll. of Aerospace and Material Engineering*, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China.
16. Antonov, A.V., Sokolov, S.V. and Chepurko, V.A. (2012), "Butstrep-metod otsenki harakteristik nadezhnosti vosstanavlivaemyih ob'ektov po spetsificheskim dannym ob otkazah" [Bootstrap method for assessing the reliability characteristics of recoverable objects based on specific failure data], *Information technologies*, No. 4, pp. 50-54.

Надійшла до редколегії 1.03.2019

Схвалена до друку 12.03.2019

Відомості про авторів:

Ланецький Борис Миколайович

доктор технічних наук професор
провідний науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5889-0307>

Коваль Ігор Вікторович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
старший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4837-7435>

Попов Валерій Петрович

науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4352-7158>

Information about the authors:

Boris Lanetskiy

Doctor of Technical Sciences
Professor
Lead Researcher of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5889-0307>

Igor Koval

Candidate of Technical Science
Senior Research
Senior Research Associate
of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4837-7435>

Valeriy Popov

Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4352-7158>

**МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОХРАНЯЕМОСТИ
БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗЕНИТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОДЛЕНИЯ ИХ НАЗНАЧЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Б.Н. Ланецкий, И.В. Коваль, В.П. Попов

Для решения задач продления назначенных показателей зенитных управляемых ракет (ЗУР) необходимо проводить оценивание показателей их остаточной сохраняемости. В связи с этим в статье предложен метод оценивания показателей сохраняемости бортового оборудования ЗУР, который содержит процедуру двухэтапного оценивания эмпирической функции распределения (ЭФР) продолжительностей хранения изделий до отказа. На первом этапе осуществляется предварительное оценивание ЭФР с использованием непараметрических методов статистики. Для предварительного оценивания ЭФР используются результаты эксплуатационных испытаний бортового оборудования ЗУР и априорная информация о вероятности безотказной работы на момент начала эксплуатации, первых лет эксплуатации и предельных сроках службы. На втором этапе осуществляется апостериорное оценивание ЭФР на основе восстановленной зависимости накопленной интенсивности отказов от продолжительности хранения. Особенностью предложенного метода является то, что возможность применения того или иного непараметрического метода ста-

тистики для построения предварительной ЭФР оценивается на основе сравнения точности оценок показателей остаточной сохраняемости, которые необходимы для решения задачи продления назначенных показателей ЗУР. Получены точечные и интервальные оценки среднего остаточного срока службы ЗУР для пяти вариантов исходных данных, которые отличаются величиной коэффициента вариации и продолжительностью наблюдений. Показано, что метод последовательного перехода к новой системе координат в сравнении с другими непараметрическими методами позволяет получить более приемлемые оценки среднего остаточного срока службы ЗУР.

Ключевые слова: продление назначенных показателей, эксплуатационные испытания, средний остаточный срок хранения, эмпирическая функция распределения, непараметрические методы статистики, априорная информация, точечные и интервальные оценки.

METHOD FOR ESTIMATING THE STORAGE MEASURES OF THE AIRBORNE EQUIPMENT OF THE SURFACE-TO-AIR GUIDED MISSILES FOR SOLVING THE PROBLEMS OF EXTENDING THEIR ASSIGNED MEASURES

B. Lanetskiy, I. Koval, V. Popov

To solve the problems of extending the assigned measures of the surface-to-air guided missiles (SAM), it is necessary to estimate the measures of their residual storage. In this regard, the article proposes a method for estimating the storage measures of the airborne equipment of SAM, which contains a procedure for two-stage estimation of the empirical distribution function (EDF) of the storage time of SAM before failure. At the first stage, a preliminary estimation of EDF is performed using non-parametric statistical methods. For preliminary estimation of EDF, the results of operating tests of the airborne equipment of SAM are used. Information about the service limit and a prior information about the probability of nonfailure operation at the time of commencement of operation and the first years of operation is also used. At the second stage, a posteriori estimation of EDF is performed on the basis of the renewed dependence of the cumulative failure rate on the storage time. The key distinction for constructing a posteriori EDF is that it takes into account a prior information about the reliability of SAM, which is available at the commencement and at the end of operation of SAM, and information that contains the results of operating tests, which are performed in accordance with the work program for extending the assigned measures of SAM. The research results of estimating accuracy for the storage measures of the airborne equipment of SAM using the known nonparametric statistical methods are given. A feature of the proposed method is that the possibility of using one or another non-parametric statistical method for constructing a preliminary EDF is estimated basing on comparison of estimating accuracy of the measures of residual storage necessary for solving the problem of extending the assigned measures of SAM. The point and interval estimations of mean residual lifetime of SAM for five variants of the initial data, which differ in the variation coefficient value and the observation length, are obtained. For each of the variants, two types of initial data are specified, depending on the beginning and the end of the operating test intervals. The article shows that the method of series transition to the new coordinate system allows to obtain more acceptable estimations of mean residual lifetime of SAM in comparison with other nonparametric methods. Under this method, the point estimation is the closest to the reference estimation, and the endpoints of its confidence interval cover the reference estimation with an acceptable confidence probability.

Keywords: extending the assigned measures, operating tests, mean residual storage time, empirical distribution function, nonparametric statistical methods, prior information, point and interval estimations.