А.М. Шатров¹, Д.С. Печура¹, В.Г. Березанський², А.С. Хижняк²

¹Державний науковий-дослідний інститут авіації, Київ

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

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКІВ СЛУЖБИ КЕРОВАНИМ ЗАСОБАМ УРАЖЕННЯ ІЗ ЗАДАНОЮ ДОСТОВІРНІСТЮ

У статті наведено методичний підхід щодо прогнозування строків служби (зберігання) керованих засобів ураження із заданою достовірністю. При цьому були використані загальні положення методології дослідження складних технічних систем, які зокрема включають проведення декомпозиції об'єкту дослідження на складові частини відповідно до рівня контролепридатності і безпеки застосування, проведення їх ранжирування щодо впливу на безпеку експлуатації, адаптація моделі надійності з аргументом, що запізнюється для прогнозування у часі кількісних показників якості та формування довірчих інтервалів на основі правила Клопера-Пірсона.

Ключові слова: довірчий інтервал, керовані засоби ураження, інтенсивність відмов, модель надійності, час запізнення аргументу.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз світового досвіду підтримання справності керованих засобів ураження (КЗУ) показав, що на озброєнні багатьох країн світу продовжують знаходитися вироби, що виготовлені у 80-х – 90-х роках минулого сторіччя, а одним із основних шляхів підтримання справності є виконання комплексу досліджень та робіт з продовження встановлених строків служби, що дає змогу максимально використовувати їх ресурсний потенціал та зменшувати витрати військових відомств. При цьому однією з основних проблем щодо їх подальшої експлуатації є значне перевищення початково-встановлених строків служби розробником (виробником) над потрібними та, як наслідок, досягнення ними граничного стану, що обумовлює необхідність припинення експлуатації. Про можливе наближення КЗУ до граничного стану може свідчити стійка тенденція росту інтенсивності відмов у часі у вигляді виходу параметрів за встановлені межі, які неможливо відновити відповідними регулюваннями або неможливість безпечної експлуатації. У загальному випадку КЗУ досягає граничного стану при переході у граничний стан хоч би однієї з його складових частин (СЧ).

Продовження встановлених строків служби КЗУ – це комплекс досліджень та робіт, які виконуються для максимально повного використання фактичних залишків їх ресурсів. Зниження вартості цих робіт може бути досягнуто насамперед за рахунок збільшення долі аналітичних та теоретичних досліджень шляхом:

– впровадження математичних моделей технічного стану КЗУ та їх СЧ;

– використання статистичної інформації про реальний технічний стан КЗУ, їх СЧ та відповідних виробів-аналогів.

Інформація про технічний стан КЗУ та їх СЧ отримується за даними поточного параметричного контролю, який охоплює практично весь арсенал виробів, і повного контролю відносно невеликої кількості (репрезентативної групи) виробів, що обумовлено необхідністю застосування методів руйнівного контролю.

Параметричний контроль, який охоплює системи наведення, керування і частково – системи живлення та дистанційного підриву, здійснюється при проведенні регламентних робіт, окремих цільових перевірок та підготовки до бойового застосування. Контроль технічного стану репрезентативної групи зазвичай проводиться при виконанні досліджень і робіт з визначення можливості продовження строків служби КЗУ. При цьому ця група виробів підлягає розбиранню з подальшими поглибленими дослідженнями тих СЧ (систем, агрегатів, блоків, тощо), що не охоплені параметричним контролем [1].

Очевидно, що в обох випадках момент виникнення відмови можна встановити лише з точністю, що визначається інтервалами перевірок, тобто для ефективного прогнозування технічного стану КЗУ необхідно з максимальною точністю встановити закон зміни інтенсивності потоку відмов $\lambda(t)$ з урахуванням неможливості безпосередньої оцінки його значень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час опублікована досить велика кількість робіт в області оцінки і прогнозування стану технічних систем [2–10], переважна більшість з яких

передбачає наявність досить жорстких обмежень на детерміновані та імовірнісні характеристики таких процесів. При цьому фактори, що визначають умови та особливості їх експлуатації, структуру та ефективність технічного обслуговування тощо, враховуються обмежено, а вплив кореляційних зв'язків взаємодіючих факторів – дуже приблизно. Такий підхід призводить до отримання досить наближених прогнозних оцінок.

Мета статті – розробка методичного підходу розв'язання задачі прогнозування технічного стану КЗУ із заданою достовірністю.

Виклад основного матеріалу

Для розв'язання задачі прогнозування технічного стану КЗУ із заданою достовірністю пропонується використовувати загальні положення методології дослідження складних технічних систем [11], які зокрема включають проведення декомпозиції об'єкту дослідження на СЧ відповідно до рівня контролепридатності і безпеки застосування, проведення їх ранжирування щодо впливу на безпеку експлуатації, адаптація моделі надійності з аргументом, що запізнюється [12] для прогнозування у часі кількісних показників якості та формування довірчих інтервалів на основі правила Клопера-Пірсона [13].

Для вирішення поставленої задачі в умовах обмеженої вибірки параметрів АЗУ, що визначають їх технічний стан пропонується використовувати модель надійності з аргументом, що запізнюється. При рішенні задачі використовуємо апріорну гіпотезу щодо сталості потоку відмов $\lambda(t)$ на етапі нормальної експлуатації системи.

У загальному вигляді модель надійності з аргументом, що запізнюється може бути записана у вигляді [12]:

$$\lambda(\underline{A}, \underline{B}, t_3) = \phi_1(\underline{A}, t) + \phi_2(\underline{B}, t) \cdot l(t - t_3), \quad (1)$$

де $\phi_1(\underline{A}, t)$ – функція, що апроксимує закон зміни інтенсивності відмов у період нормальної експлуатації системи (як правило це лінійна функція);

$\phi_2(\underline{B}, t)$ – функція, що апроксимує закон зміни інтенсивності відмов у період масових відмов;

t_3 – час запізнення аргументу, який визначає час переходу системи у несправний стан;

$l(t - t_3)$ – одинична функція, що може приймати значення $l(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0; \\ 0, x < 0. \end{cases}$

Очевидно, що для визначення моменту початку масових відмов системи необхідно оцінити t_3 з максимальною точністю.

Відомо декілька підходів щодо оцінки t_3 . Враховуючи, що модель (1) лінійна по параметрах

$(a'_0, a'_1; b'_0, b'_1) = (\underline{A'}, \underline{B'})$, то фіксуємо t_3 та обчислюючи її відомими методами, наприклад методом найменших квадратів (МНК), отримуємо значення функціоналу, який відповідає вибраному t_3 . Далі задача зводиться до мінімізації функції:

$$\min_{\underline{A'}, \underline{B'}} J(\underline{A'}, \underline{B'}) = j(t_3), \quad (2)$$

яка може бути розв'язана стандартними методами пошуку мінімуму функції однієї змінної. Більш точну оцінку t_3 можна отримати при використанні інтегрального МНК [3]. Значення t_3 можна також отримати з використанням методів індивідуальних або колективних експертних оцінок, тобто інтуїтивних методів прогнозування.

Разом з цим, наведені та інші методики визначення t_3 не враховують імовірність досягнення граничних значень параметрами, що визначають технічний стан КЗУ та його СЧ. У зв'язку з цим пропонується наступна методика його визначення. За результатами вибірки параметру x_i при різних строках служби АЗУ методами регресійного аналізу можливо визначити тенденцію його зміни та визначити строк служби при якому розрахункове значення параметру x_{i+n} досягне граничного значення $X_{Гр}$. Остаточний вибір апроксимації та прогнозування пропонується здійснювати за рекомендаціями ДСТУ 3004-95 [14]: експоненціальний розподіл, характерний для агрегатів та технічних систем, що мало підлягають старінню та спрацюванню, а розподіл Вейбулла-Гнеденко – для систем, яким притаманні процеси механічного руйнування, стомлення, корозії, раптових змін їх властивостей. Так як більшу частину строку служби КЗУ знаходяться у режимі зберігання у спеціальних сховищах, в яких вони захищені від дії негативних кліматичних факторів, при цьому на них не діють динамічні навантаження, а статичні визначаються, в основному, їх власною вагою та зусиллями стикувальних з'єднань, доцільно використовувати [14] експонентний розподіл $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$.

Для прогнозування тривалості експлуатації КЗУ та СЧ із заданою імовірністю P , необхідно розрахувати та побудувати довірчі інтервали таким чином, щоб дійсні значення параметру X не виходили за межі інтервалу ε , тобто повинна виконуватись нерівність [14]:

$$\alpha = P[|(\hat{X}_i + \sigma) - (\hat{X}_i - \sigma)|] \leq \varepsilon, \quad (3)$$

де α – функція двох аргументів t_a та n , яка визна-

чається як $\alpha = 2 \int_0^{t_a} S n(t) dt$;

σ – середньоквадратичне відхилення значення параметру;

$\varepsilon = t_a S$ – довірчий інтервал.

Величина t_a визначається відповідно до заданої імовірності та кількості наявних статистичних даних (n) по таблиці, наведеній в [14]. При визначенні σ необхідно використовувати незміщені оцінки математичного очікування $m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ та дисперсії σ_x^2 [13]:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2}, \quad (4)$$

де x_i – значення параметра x у кожному з n незалежних вимірів.

Тоді довірчі інтервали розраховуються як:

$$\varepsilon \geq \hat{X}_i \pm t_a \sigma. \quad (5)$$

Виконавши обчислення за (4) у всьому діапазоні відомих значень x_i , отримаємо довірчі інтервали, обмежені кривими $\hat{X}_i + t_a \sigma$ та $\hat{X}_i - t_a \sigma$.

Прогнозування виконується по одному або групі визначальних параметрів на визначений термін із заданою імовірністю, яка може бути визначена на основі відомих чи заданих значень потрібного рівня ефективності та безпеки функціонування АЗУ. Граничні значення параметрів визначені у відповідній нормативно-технічній документації.

Для СЧ, що не охоплені параметричним контролем, імовірність їх знаходження у справному стані протягом всього призначеного строку служби не нижче 0,97, що забезпечується відповідними технічними рішеннями і технологіями виготовлення.

Так, наприклад, потрібна імовірність безвідмовної роботи ракетного двигуна твердого палива становить 0,990 ... 0,999 [1]. Інша ситуація з СЧ, що періодично перевіряються штатними засобами контролю протягом всього періоду їх експлуатації. Імовірність їх працездатного стану знаходиться у досить широких межах – від 0,7 до 0,95 [1]. Саме тому КЗУ періодично перевіряються і відбраковуються по результатах параметричного контролю.

У якості прикладу на рис. 1, рис. 2 наведено результати прогнозування по одному з визначених параметрів X із заданою імовірністю 0,85, де $X_{ГР}$ – граничне значення параметра X ; ε – довірчий інтервал, розрахований за (3); t_3 – час запізнення відповідно; $t_{ПР}$ – та термін прогнозу.

По результатах прогнозування деякого параметру X та його граничним значенням, можна визначити величину t_3 .

Рис. 1. Результати прогнозування (довірчий інтервал не перетинає граничне значення параметру)
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 2. Результати прогнозування (довірчий інтервал перетинає граничне значення параметру)
Джерело: розроблено авторами.

При цьому можливі два варіанти:

– довірчий інтервал ε не перетинає граничне значення параметру $X_{ГР}$ (допуску) в межах заданого терміну прогнозу $t_{ПР}$ (рис. 1);

– довірчий інтервал ε перетинає граничне значення параметру $X_{ГР}$ в межах терміну прогнозу $t_{ПР}$ (рис. 2).

У першому випадку (рис. 1) час запізнення (t_3) можна обчислити за виразом (2) або будь-яким відомих методом, але у будь-якому випадку він не може перевищувати заданий термін прогнозу, тобто повинна виконуватися нерівність $t_3 \leq t_{ПР}$. При цьому необхідно мати на увазі, що досвід виконання відповідних досліджень підприємствами промисловості та науково-дослідними установами України показав, що у більшості випадків продовження строків служби КЗУ більш, ніж на 5 років (тобто .. років) є недоцільним [15]. Це обумовлено тим, що на теперішній час теорію довготривалого зберігання СЧ, що містять матеріали спецхімії (вибухових ре-

човин, твердого ракетного палива, порохів та піротехнічних складів, тощо) у достатній мірі не розроблено, тобто не встановлено кількісного зв'язку між їх хімічною стійкістю та термінами зберігання, а реальні строки експлуатації можна встановити лише емпіричним шляхом по результатах лабораторно-експериментальних досліджень та випробувань.

У другому випадку (рис. 2) значення t_3 пропонується визначати, як інтервал часу між останнім вимірюванням і точкою виходу довірчого інтервалу межі допуску цього параметру, тобто $t_{PP} = t_3$. Тоді визначення нових призначених строків служби T_{PCC} визначається як $T_{PCC} = T_{CC} + T_{PP}$, де T_{CC} – строк служби КЗУ; T_{PP} – термін продовження.

При цьому розраховувати термін продовження (T_{PP}) пропонується за алгоритмом

$$\begin{cases} T_{PP} = t_{PP} = t_3, & \text{якщо } t_{PP} < t_3; \\ T_{PP} = t_{PP} = 5 \text{ років}, & \text{якщо } t_{PP} \geq t_3. \end{cases} \quad (6)$$

Основні положення запропонованого підходу було апробовано при проведенні досліджень з продовження строків служби деяким типам КЗУ та їх СЧ. При цьому було проведено ретроспективний порівняльний аналіз прогнозованих і реальних значень визначальних параметрів, отриманих при

параметричному і вибіркового руйнівного контролю, результати яких в основному підтвердили працездатність запропонованого методичного підходу.

Висновки

Для розв'язання задачі прогнозування технічного стану КЗУ із заданою достовірністю були використані загальні положення методології дослідження складних технічних систем [11], які зокрема включають в себе проведення декомпозиції об'єкту дослідження на складові частини відповідно до рівня контролепридатності і безпеки застосування. Проведення ранжирування складових частин щодо впливу на безпеку експлуатації, адаптація моделі надійності з аргументом для прогнозування у часі кількісних показників якості та формування довірчих інтервалів проводилось на основі правила Клопера-Пірсона [13]. При цьому було проведено ретроспективний порівняльний аналіз прогнозованих і реальних значень визначальних параметрів, отриманих при параметричному і вибіркового руйнівного контролю, результати яких в основному підтвердили працездатність запропонованого методичного підходу. Даний підхід можливо використовувати при розв'язанні задач пов'язаних з продовженням строків служби керованим засобам ураження.

Список літератури

1. Коростелев О.П. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т. 11. Синтез системы поддержания исправности средств поражения: монография / О.П. Коростелев. – К.: Вид. дім Дмитра Бураго, 2019. – 332 с.
2. Хижняк В.В. Аналіз методів прогнозування технічного стану складних систем та особливості їх застосування при формуванні програм експлуатації державних еталонів / В.В. Хижняк, А.О. Литовченко, А.Г. Дмитрієв // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 4(48). – С. 57-60.
3. Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем / Н.А. Махутов, В.Н. Пермяков, Р.С. Ахметханов и др. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 632 с.
4. Беркетов Г.А. Прогнозирование остаточного ресурса технических систем с помощью параметрических моделей изменения надёжности / Г.А. Беркетов, А.П. Цуркин, Д.В. Головкин // Экономика, Статистика и Информатика. – 2013. – № 1. – С. 136-139.
5. Gloud G.L. Optical methods in engineering analyses / G.L. Gloud. – Cambridge: Univ. Press, 1998. – 503 p.
6. Parsaye K. A Characterization of Data Mining Technologies and Processes / K. Parsaye // The Journal of Data Warehousing. – 1998. – № 1. – P. 65-69.
7. Ахметханов Р.С. Анализ временных рядов в диагностике технических систем / Р.С. Ахметханов, Е.Ф. Дубинин, В.И. Кукова // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – № 2. – С. 11-22.
8. Madsen H.O. Probability-based optimization of fatigue design, inspection and maintenance / H.O. Madsen, J.D. Sorensen // IV Conference Integrity of Offshore Structures, Glasgow, 1990. – 224 p.
9. Абрамов О.В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / О.В. Абрамов // Информатика и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 4-15.
10. Карлин С. Чебышевские системы и их применение в анализе и статистике: пер. с англ. / С. Карлин, В.М. Стадден. – М.: Наука, 1976. – 568 с.
11. Ковтуненко А.П. Основы анализа сложных технических систем. Теория и приложения: монография / А.П. Ковтуненко, В.В. Зубарев. – К.: НАУ, 2009. – 483 с.
12. Зубарев В.В. Математические методы оценки и прогнозирования технических показателей эксплуатационных показателей радиоэлектронных систем: монография / В.В. Зубарев, А.П. Ковтуненко, Л.Г. Раскин. – К.: НАУ, 2005. – 184 с.
13. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
14. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. – К.: Держстандарт України, 1995.
15. Коростелев О.П. Прогноз долговечности управляемых авиационных средств поражения в Украине / О.П. Коростелев, А.А. Любарев, В.К. Мамонтов // Технологические системы. – 2010. – № 4(53). – С. 10-15.

Надійшла до редколегії 01.10.2020

Схвалена до друку 17.11.2020

Відомості про авторів:

Шатров Андрій Миколайович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3070-7483>

Печура Дмитро Сергійович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5703-4039>

Березанський Володимир Григорович

кандидат технічних наук
доцент кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3753-0016>

Хижняк Андрій Сергійович

старший викладач
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9122-7793>

Information about the authors:

Andrii Shatrov

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Lead Research
of State Science and Preceding Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3070-7483>

Dmytro Pechura

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Senior Research Associate
of State Science and Preceding Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5703-4039>

Volodymyr Berezanskyi

Candidate of Technical Sciences
Senior Lecturer
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3753-0016>

Andrii Khyzhniak

Senior Instructor
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9122-7793>

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СРОКОВ СЛУЖБЫ
УПРАВЛЯЕМЫМ СРЕДСТВАМ ПОРАЖЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ДОСТОВЕРНОСТЬЮ**

А.Н. Шатров, Д.С. Печура, В.Г. Березанський, А.С. Хижняк

В статье приведены методический подход к прогнозированию сроков службы (хранения) управляемых средств поражения с заданной достоверностью. При этом были использованы общие положения методологии исследования сложных технических систем, в частности, включающие проведение декомпозиции объекта исследования на составные части, в соответствии с уровнем контролепригодности и безопасности применения. Проведение их ранжирования по влиянию на безопасность эксплуатации, адаптация модели надежности с аргументом, что опаздывает для прогнозирования во времени количественных показателей качества и формирования доверительных интервалов на основе правила Клопера-Пирсона.

Ключевые слова: доверительный интервал, управляемые средства поражения, интенсивность отказов, модель надежности, время опоздания аргумента.

**METHODOLOGICAL APPROACH TO FORECASTING
THE TERMS OF SERVICE TO MANAGED VICTIMS WITH DEFINED RELIABILITY**

A. Shatrov, D. Pechura, V. Berezansky, A. Khyzhniak

At present, there is a large number of works in the field of assessment and forecasting of the state of technical systems, the reevaluation of most of which involves the manifestation of the study of severe restrictions on deterministic and their characteristics. At the same time, factors, mental and special characteristics change, technical conditions of service are processed and effective, are taken into account to a limited extent, influential correlations in interacting factors - very much. This approach leads to the study of approximate estimates. The article presents a methodical approach to forecasting the service life (storage) of controlled means of destruction with a given reliability. The general provisions of the methodology of research of complex technical systems were used, which in particular include decomposition of the object of research into components according to the level of controllability and safety of application, their ranking on the impact on operational safety, adaptation of the reliability model with a delay argument. forecasting over time quantitative indicators of quality and the formation of confidence intervals based on the Cloper-Pearson rule. The main provisions of the proposed approach have been tested in studies to extend the service life of some types of controlled means of destruction and their components. A retrospective comparative analysis of the predicted and actual values of the determining parameters obtained during parametric and selective destructive testing was performed, the results of which mainly confirmed the efficiency of the proposed methodological approach. The developed methodical approach unlike others allows to solve problems of forecasting of a technical condition of the managed means of defeat with the set reliability at use of the general provisions of methodology of research of difficult technical systems. This approach can be used to solve problems related to extending the life of controlled means of destruction.

Keywords: confidence interval, controlled means of defeat, failure rate, reliability model, argument delay time.