

УДК 629.7.083

Д.С. Печура<sup>1</sup>, В.Г. Березанський<sup>2</sup>, О.Г. Березанський<sup>2</sup>, Д.О. Васильченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Державний науковий-дослідний інститут авіації, Київ<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН АВІАЦІЙНИХ КЕРОВАНИХ РАКЕТ ЗА ВИЗНАЧЕНИМИ ГРУПАМИ

У статті запропоновано підхід щодо прогнозування технічного стану складових частин авіаційних керованих ракет по контрольованим та неконтрольованим параметрам на основі регресійного аналізу, який дозволяє визначити тривалість експлуатації авіаційних керованих ракет за технічним станом та складових частин ракет, які не контролюються протягом експлуатації.

**Ключові слова:** авіаційні керовані ракети, прогнозування, технічний стан, регресійний аналіз, експлуатація, рівняння регресії.

### Вступ

**Постановка проблеми та аналіз літератури.** Одним із шляхів підтримання справності авіаційних керованих ракет (АКР) є виконання комплексу досліджень та робіт з метою продовження їх встановлених строків служби, освоєння їх ремонту та переведення на експлуатацію за технічним станом. При цьому, важливим є використання функціональної декомпозиції АКР для розподілу її складових частин на групи за рівнем контролепридатності та безпеки застосування [1, 2]. Такий підхід дозволяє розробити для кожної групи науково-обґрунтовані пропозиції та методичні рекомендації щодо продовження призначених показників, оцінити можливість переведення на експлуатацію за технічним станом та визначити можливі шляхи підтримання справності. Тому виникає актуальна науково-

прикладна задача прогнозування строку служби складових частин АКР за визначеними групами.

**Мета статті:** розробка підходу щодо прогнозування технічного стану складових частин авіаційних керованих ракет за визначеними групами при сумісному використанні контрольованих та неконтрольованих параметрів на основі регресійного аналізу.

### Основний матеріал

Аналіз досліджень [3 – 6] щодо визначення можливості продовження строків служби ракет дозволив зробити висновки, що для кожної складової частини АКР модель прогнозування її технічного стану необхідно підбирати індивідуально, за групами. Це пов'язано з тим, що конструктивною особливістю ракет є наявність контрольованих (табл. 1) та неконтрольованих агрегатів та систем.

Таблиця 1

Значення та найменування контрольованих параметрів ракети

Параметр		Роки експлуатації ракет, роки ( $x_i$ )						
№	найменування	0	4	8	12	16	20	22
22-1	Інтервал видачі команди «Готов»	-3	0	0	-2	-1	-5	-2
23-2	Інтервал видачі команди «ТГ»	-2	0	-2	-1	0	-2	-2
35-2	Коефіцієнт передачі по омега II	3	0	2	4	1	3	3
46-2	Коефіцієнт передачі КНПИ	-3	0	-3	-2	-2	-3	-2
51-1	Нульове положення рулів ІК	5	3	0	-	2	4	2
53-1	Нульова помилка стабілізації рулів ІК	3	2	2	2	2	2	2

При цьому прогнозування по контрольованих параметрах доцільно виконувати індивідуально для кожної ракети, а по неконтрольованих – по групах.

Рівень контролепридатності складових частин ракет дозволяє оцінювати їх технічний стан з високим ступенем достовірності протягом всього періоду експлуатації, а відповідна обробка результатів контролю дозволяє:

- виявити найменш надійні блоки та агрегати;
- проводити прогнозування технічного стану та виявляти наближення передвідмовного стану;
- планувати та впроваджувати відповідні заходи щодо підтримання справності.

У процесі зміни значення параметра наявні два чинники (компоненти) – закономірний компонент, який має назву “тенденція” та імовірний компонент, який накладається на перший, детермінований. Знання тенденції дозволяє обґрунтовано організувати експлуатацію ракет, своєчасно виконувати необхідне технічне обслуговування і ремонт, вирішувати питання забезпечення справності парку ракет на заданому рівні. Імовірний компонент дозволяє з достатнім рівнем вірогідності спрогнозувати тривалість експлуатації  $T_{\text{гран}}$  протягом якого математичне очікування параметра не перевищить його допустимі значення  $u_{\text{доп}}$ . Визначити ці компоненти та виконати

прогнозування технічного стану складової частини ракети можливо за допомогою математичного апарату теорії імовірності – регресійного аналізу [7 – 8].

У загальному випадку, за результатами вимірювання деякого параметру  $y_i$  при різних строках служби ракети  $x_i$  за допомогою методу регресійного аналізу можливо визначити:

- тенденцію зміни вказаного параметру;
- спрогнозувати граничний строк служби, при якому розрахункове значення параметру  $y_{i+n}$  досягне допустимого значення  $y_{доп}$ .

При використанні регресійного методу для аналізу статистичних або експериментальних даних про зміну будь-якого параметра детермінований компонент може бути однією з функцій:

- степенева регресія  $y = b x^a$ ;
- експонентна регресія  $y = b e^{ax}$ ;
- лінійна регресія  $y = a x + b$ ;
- логарифмічна регресія  $y = a \ln(x)$ .

Лінія регресії  $\hat{Y}_i$  з деякою вірогідністю відображає тенденцію зміни параметра. Для побудови лінії регресії необхідно вибрати одну з вказаних функцій, яка б у повній мірі відповідала реальній тенденції зміни значення контрольованого параметра.

При оцінюванні множини статистичних результатів, що отримані при наявності  $n$  вимірних значень параметру  $(y_1; x_1), (y_2; x_2), \dots, (y_n; x_n)$ , рівняння регресії має вигляд:

$$y = a x + b; \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right) / n}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n}; \quad (2)$$

$$b_0 = y - b_1 x. \quad (3)$$

Підставив рівняння (2) та (3) у (1) отримаємо рівняння регресії:

$$\hat{Y}_i = \bar{y} + b_1(x_i - \bar{x}). \quad (4)$$

На підставі значень таблиці можна розрахувати значення лінії регресії. При цьому ( $n = 7$ ),  $\bar{x}$  і  $\bar{y}$  – середньоарифметичні значення величин  $y_i$  та  $x_i$  – розраховуються таким чином:

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n = \sum x_i / n; \quad (5)$$

$$\bar{y} = (y_1 + y_2 + \dots + y_n) / n = \sum y_i / n; \quad (6)$$

$$\sum x_i y_i = (x_1)(y_1) + (x_2)(y_2) + \dots + (x_n)(y_n); \quad (7)$$

$$\sum x_i^2 = (x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots + (x_n)^2. \quad (8)$$

Підставив розраховані значення  $b_1, \bar{x}, \bar{y}$  у (4), отримаємо відповідне рівняння лінії регресії. Підстановкою значень  $x_i$  у (4) розраховуються значення лінії регресії. Відповідність реальної тенденції зміни рівня параметру можливо оцінити з допомогою коефіцієнта кореляції

$$R^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{y})^2 / \sum (y_i - \bar{y})^2. \quad (9)$$

Чим більша величина  $R^2$ , тим краще лінія регресії відображає тенденцію зміни параметра, більше експериментальних (статистичних) точок належать лінії регресії, а інші ближче згруповані біля неї. З усіх ліній регресії з найбільшою вірогідністю відображає тенденцію зміни параметрів та, якій відповідає більше значення коефіцієнту кореляції. Тому необхідно провести розрахунки ліній регресії та коефіцієнтів кореляції для усіх можливих функцій і порівняти між собою. Наприклад, для параметру 22-1 – це степенева функція, при якій коефіцієнт кореляції найбільший і складає  $R^2 = 0,18847095561353$ .

Для прогнозування тривалості експлуатації ракети із заданою імовірністю, необхідно розрахувати та побудувати довірчі інтервали для того, щоб із заданою імовірністю  $P$  дійсні значення параметру не виходили за межі цього інтервалу  $\varepsilon$ . Тобто повинна виконуватись наступна нерівність

$$\alpha = P \left[ \left| (\hat{Y}_i + \sigma) - (\hat{Y}_i - \sigma) \right| \right] \leq \varepsilon, \quad \varepsilon = t_a S, \quad (10)$$

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

де  $\alpha$  – функція двох аргументів  $t_a$  і  $n$ ;  $t_a$  – визначається за заданою імовірністю та кількістю  $n$  наявних статистичних даних (при  $n = 7, \alpha = 0,85, t_a = 1,44$ );  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення значення параметру.

Оскільки кожна окрема ракета перевіряється раз у чотири роки [9], то необхідно використовувати незміщені оцінки математичного очікування та дисперсії. Тоді довірчі інтервали можливо розрахувати як

$$\varepsilon \geq \hat{Y}_i \pm t_a \sigma, \quad (11)$$

де

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{Y}_i)^2 \right] \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right]}.$$

Виконавши обчислення за (11) у всьому діапазоні значень  $x_i$ , отримаємо довірчі інтервали обмежені кривими  $\hat{Y}_i + t_a \sigma$  та  $\hat{Y}_i - t_a \sigma$ .

У якості прикладу здійснимо прогнозування значень деяких параметрів щодо наближення по ним граничного строку служби. У якості вхідних даних використаємо їх значення при різних строках служби ракети. Із таблиці видно, що значення кожного параметра можна представити у вигляді множини точок  $y_i$ , яка у цілому й визначає характер його зміни від строку служби ракети. Отже, необхідно обчислити закон зміни контрольованого параметра  $y_i$  в залежності від строку служби. Результати прогнозування параметрів, які наведено у таблиці із заданою імовірністю 0,85, наведено на рис. 1 – 6.



Рис. 1. Прогнозування значення параметру 22-1



Рис. 2. Прогнозування значення параметру 23-2

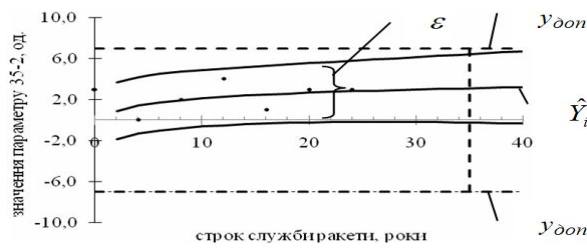


Рис. 3. Прогнозування значення параметру 35-2



Рис. 4. Прогнозування значення параметру 46-2



Рис. 5. Прогнозування значення параметру 51-1



Рис. 6. Прогнозування значення параметру 53-1

Аналіз (11) показує, що усі складові величини постійні, за виключенням  $(x_0 - \bar{x})^2$ . Тому, при збільшенні відхилення  $x_0$  від  $\bar{x}$  дисперсія зростає. На графіках (рис. 1 – 6) це зображено розширенням інтервалу  $\hat{Y}_i \pm t_a \sigma$  відносно лінії регресії. Прогнозований строк служби ракети з заданою імовірністю буде визначатися на перетині ліній  $\hat{Y}_i \pm t_a \sigma$  та  $Y_{доп}$ .

З прикладів, наведених на рис. 1 – 6, видно, що досліджувані параметри ракети (крім параметру 22-1) не вийдуть за межі допусків протягом 35 років експлуатації ракети. Параметр 22-1 (рис. 1) може вийти за межі допустимих значень після 26 років служби. Але дійсний граничний строк служби ракети може бути більшим, ніж отриманий за результатами регресійного аналізу. Це обумовлено тим, що найменша похибка розрахунків знаходиться в області отриманих статистичних даних і чим далі відходимо від цієї області, тим менша точність розрахунків. Тому, з урахуванням вірогідності прогнозу та можливої похибки при наданні статистичних даних доцільно під час подальшої експлуатації періодично контролювати тенденцію зміни параметра і проводити уточнюючі розрахунки граничного строку служби ракети.

При прогнозуванні технічного стану складових частин ракет, які не контролюються протягом експлуатації, використовується інформація про їх технічний стан, що була отримана за результатами лабораторно-експериментальних досліджень.

Результати прогнозування деяких параметрів складових частин, що не контролюються протягом експлуатації, за даними, які були отримані при проведенні лабораторно-експериментальних досліджень наведено на рис. 7 – 9.

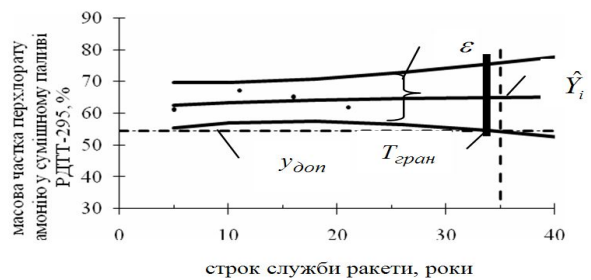


Рис. 7. Прогнозування значення масової частки перхлорату амонію у паливі двигунів РДТТ-295

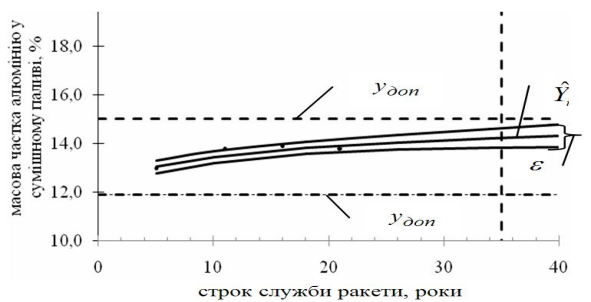


Рис. 8. Прогнозування значення масової частки алюмінію у паливі двигунів РДТТ-295

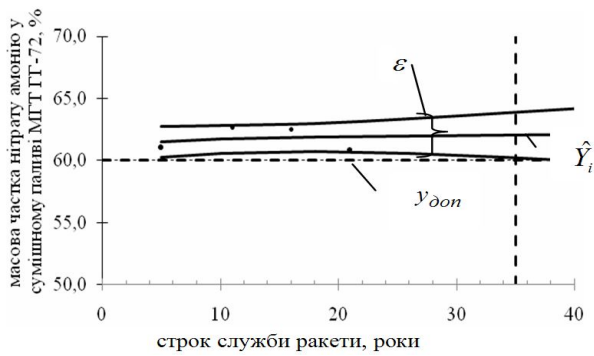


Рис. 9. Прогнозування значення масової частки нітрату амонію у паливі газогенераторів 9-П-1028

Отже, запропонований підхід дозволяє оцінювати тенденцію зміни та прогнозувати значення із заданою імовірністю параметри складових частин і цієї групи. У загальному вигляді алгоритм прогнозування можливо формалізувати таким чином:

- підготовка і введення статистичної інформації (значень контрольованих параметрів);
- перевірка правильності функціонування складових частин ракети з використанням індивідуальних допустимих значень контрольованих параметрів;
- розрахунок тенденції зміни значень контрольованих параметрів за строком служби з використанням всієї статистичної інформації;
- прогнозування строку служби із заданою імовірністю з використанням (1)...(11) і можливостей програми *Excel* щодо розрахунків та графічного представлення результатів;
- науково-технічна експертиза результатів прогнозування та обґрунтування рішення про можливість подальшої експлуатації.

## Висновки

Запропонований підхід щодо прогнозування технічного стану складових частин авіаційних керування ракет дозволить оцінювати тенденцію зміни значень контрольованих параметрів та визначати тривалість їх експлуатації за технічним станом. Такий підхід можливо використовувати і при прогно-

зуванні технічного стану складових частин АКР, які не контролюються протягом експлуатації. При аналізі параметрів, які регулюються в процесі експлуатації, немає необхідності в розрахунку довірчих інтервалів, адже в допустимих границях значення параметрів вже враховано деяку імовірність.

## Список літератури

1. Шатров А.М. *Можливі шляхи удосконалення системи організації робіт з продовження призначених строків служби керування авіаційним засобом ураження* / А.М. Шатров, Д.С. Печура // *Науково-теоретичний та науково-практичний збірник наукових праць ДНДІА*. – 2011. – Вип. 7(14). – С. 188-191.
2. Печура Д.С. *Шляхи удосконалення методичного апарату підтримання справності авіаційних засобів ураження* / Д.С. Печура // *Збірник наукових праць НУО України*. – 2014. – Вип. 1(121). – С. 185-187.
3. Давыдов П.С. *Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем* / П.С. Давыдов. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
4. Биргер И.А. *Техническая диагностика* / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
5. Барзилович Е.Ю. *Эксплуатация авиасистем по техническому состоянию* / Е.Ю. Барзилович, А.И. Воскобоев. – М.: Транспорт, 1981. – 76 с.
6. Левченко А.О. *Аналіз складу технічних засобів системи технічного обслуговування комплексів керування ракетної зброї танків* / А.О. Левченко, В.В. Хахула // *Системи озброєння і військова техніка*. – Л.: Львівський інститут Сухопутних військ Національного університету "Львівська політехніка", 2009. – Вип. 2(18). – С. 22-26.
7. Дрейпер Н. *Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1* / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 369 с.
8. Дрейпер Н. *Прикладной регрессионный анализ. Кн. 2* / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 353 с.
9. Выпуск № 4828. *Руководство по технической эксплуатации АСП в частях ВВС, 1984. Ч. 1 – руководство по технической эксплуатации управляемых ракет в частях фронтовой и армейской авиации*.

Надійшла до редколегії 12.02.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук ст. наук. співр. Є.О. Українець, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ АВИАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ ЗА ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ГРУППАМИ

Д.С. Печура, В.Г. Березанский, А.Г. Березанский, Д.О. Васильченко

*В статье предложено подход о прогнозировании технического состояния составных частей авиационных управляемых ракет по контролируемым и неконтролируемым параметрам на основании регрессивного анализа, который позволяет определить длительность эксплуатации авиационных управляемых ракет по техническому состоянию и составом частей ракет, которые не контролируются на протяжении эксплуатации.*

**Ключевые слова:** авиационные управляемые ракеты, прогнозирования, техническое состояние, регрессионный анализ, эксплуатация, уравнение регрессии.

## PREDICTION TECHNOLOGY WILL BECOME PART OF AVIATION MISSILES DEFINED GROUPS

D.S. Pechura, V.G. Beresanskiy, O.G. Beresanskiy, D.O. Vasilchenko

*The paper proposes a prediction approach to the technical state of the components of air guided missiles in controlled and uncontrolled parameters based on regression analysis, which allows to determine the service life of the aircraft missiles and the technical condition of the components of the missile's control during the operation.*

**Keywords:** aviation guided rockets, prognostications, technical state, regressive analysis, exploitation, equalization of regression.