

УДК 519.873

А. Г. Павленко, Р. А. Момот

## ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ МЕТОДАМИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ

*Стаття присвячена проблемі переведення літальних апаратів на експлуатацію за технічним станом. Запропоновано підхід до прогнозування безвідмовності бортового обладнання літальних апаратів у процесі експлуатації, у якому використані методи статистичного аналізу часових рядів. Наведено результати прогнозування параметра потоку відмов з використанням комбінованої моделі авторегресії та ковзного середнього.*

*К л ю ч о в і с л о в а:* літальний апарат, безвідмовність, параметр потоку відмов, авторегресія, ковзне середнє.

**Постановка проблеми.** Ефективність функціонування складних технічних систем (СТС), як відомо, визначається, поряд з іншими факторами, технічним станом СТС та їх елементів. До класу СТС віднесено і літальний апарат (ЛА), однією з компонентів якого є бортове обладнання.

Необхідність визначення технічного стану таких систем у процесі експлуатації з метою підтримання їх справності та готовності до застосування значно зросла за останні двадцять років у зв'язку із закінченням календарних термінів експлуатації ЛА радянського виробництва та жорстким обмеженням фінансування виконання капітальних ремонтів у даний час. Одним з перспективних шляхів розвитку та удосконалення технічної експлуатації ЛА є перехід на експлуатацію за технічним станом, що передбачає виконання широкого кола наукових і практичних завдань, серед яких – удосконалення методів та засобів контролю технічного стану ЛА та їх елементів [1].

Ознаками технічного стану системи можуть бути: значення напругування (нальоту, пробігу) або терміну служби, значення відповідних діагностичних параметрів та показників надійності (безвідмовності) [2]. Конструкція багатьох типів ЛА передбачає застосування відповідного діагностичного обладнання в умовах експлуатації тільки для обмеженої кількості елементів, що зумовлює необхідність використання результатів статистичного контролю надійності. Основною метою контролю надійності в сучасних умовах експлуатації є своєчасне виявлення моментів виникнення деградаційних процесів, обумовлених дією різноманітних факторів. Моменти початку процесів деградації є випадковими та індивідуальними для кожного типу обладнання ЛА, що додає певну частку невизначеності у терміни безпечної та ефективної експлуатації.

Контроль надійності (безвідмовності) передбачає використання деякого нормативного значення (допуску) відповідного показника, яке доцільно визначати за результатами прогнозування.

Практика експлуатації окремих типів ЛА свідчить про невідповідність прийнятого підходу до контролю рівня надійності умов експлуатації ЛА. Підхід, що існує, заснований на порівняльному аналізі експлуатаційних даних про відмови та несправності з відповідними даними за попередні періоди експлуатації. Це не дозволяє зробити якісні висновки про фактичний рівень надійності виробів відносно її певного граничного рівня, також існуючий підхід не передбачає прогнозування відповідного показника.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У науково-технічній літературі [3; 6–8] достатньо добре описані як методи прогнозування, що засновані на моделюванні досліджуваних процесів, так і методи екстраполяції наявної інформації. Найбільш поширеними методами прогнозування є метод групового врахування аргументів, нейромережеве прогнозування, методи, що засновані на використанні апарату теорії статистичного розпізнавання образів, факторного аналізу тощо. Більшість зазначених методів передбачають підбір моделі прогнозу за допомогою процедур самонавчання з урахуванням декількох факторів (вхідних змінних моделі). Складність використання даних методів у процесі експлуатації обумовлена обмеженістю можливостей отримання статистичної вибірки, що навчає, за багатьма факторами. Окрім цього, зазначені методи є достатньо трудомісткими, що знижує оперативність прогнозу, вони більш придатні для виконання завдань наукових досліджень, ніж до умов експлуатації ЛА.

Найбільш простим та зручним для застосування є метод лінійної регресії – один з методів екстраполяції, але він дає велику помилку прогнозу (20–30 %). Зменшення помилки, за достатньої оперативності та зручності процедури прогнозування, що є важливим для умов експлуатації ЛА, можна досягти використанням методів статистичного аналізу часових рядів.

**Мета статті** – удосконалення процедури прогнозування безвідмовності бортового обладнання ЛА у процесі експлуатації. Даний підхід базується на використанні методів статистичного аналізу часових рядів.

**Виклад основного матеріалу.** Більшість методів аналізу часових рядів реалізовані у статистичних пакетах типу SAS, SUSTAT, SPSS, STSC, Statistika, Minitab, WinSTAT, STADIA, ЭВРИСТА, ОЛИМП та Excel [9].

Застосування запропонованого методу проілюструємо на статистичних даних про відмови та несправності блоку логіки системи бортового контролю літаків з 1998 до 2005 р. (табл.).

Т а б л и ц я

Значення параметра потоку відмов  $\hat{z}_{\phi_i}$  за періодами експлуатації

Період	1998, I	1998, II	1999, I	1999, II	2000, I	2000, II	2001, I	2001, II
$\hat{z}_{\phi_i}$ , год <sup>-1</sup>	0,0012	0,0012	0,001	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016	0,0013
Період	2002, I	2002, II	2003, I	2003, II	2004, I	2004, II	2005, I	2005, II
$\hat{z}_{\phi_i}$ , год <sup>-1</sup>	0,0016	0,0017	0,0012	0,0015	0,0019	0,0019	0,0014	0,0022

Оцінка фактичного значення параметра потоку відмов за  $i$ -й контрольний період (півріччя) експлуатації визначається за формулою:

$$\hat{z}_{\phi_i} = \frac{n_{\phi_i}}{t_{\Sigma_i} \cdot a}, \quad (1)$$

де  $n_{\phi_i}$  – фактична кількість відмов та несправностей за  $i$ -й контрольний період експлуатації, од.;

$t_{\Sigma_i}$  – сумарний наліт парку ЛА за період, год;  $a$  – кількість однотипних виробів на одному ЛА, од.

Графік часового ряду за даними таблиці представлений на рис. 1.

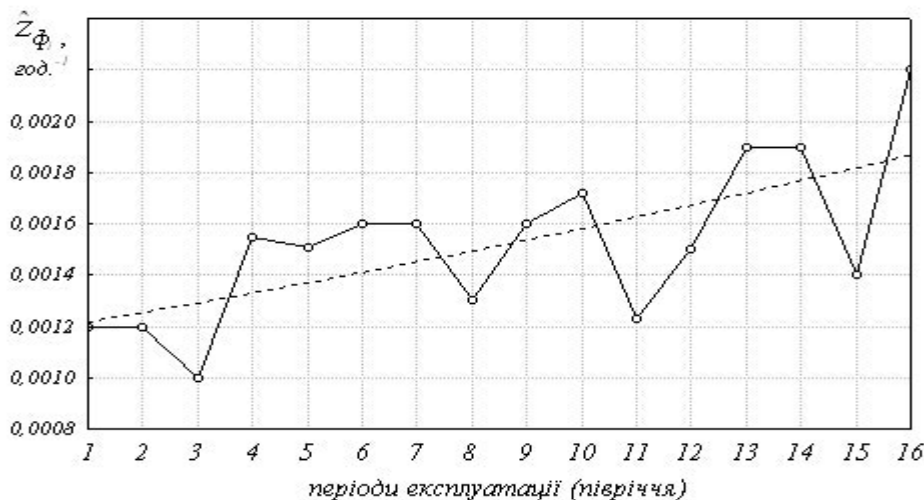


Рис. 1. Графік часового ряду оцінки  $\hat{z}_{\phi_i}$

Послідовність розв'язування задачі прогнозування є такою: визначення типу теоретичного розподілу часового ряду; побудова графіка і цензурування або вінзоризація часового ряду; перевірка гіпотези про наявність тренда; аналіз корелограм та періодограми часового ряду; ідентифікація моделі часового ряду; виконання прогнозування і перевірка адекватності моделі [10].

Оброблення даних таблиці за вказаною послідовністю дозволило вибрати модель часового ряду з класу моделей ARIMA (Autoregression and Integrated Moving Average) та визначити її параметри.

Модель ARIMA (АРІМС – авторегресії та проінтегрованого ковзного середнього) передбачає моделювання двох видів процесів: авторегресії і ковзного середнього [4; 5; 8]. У загальному вигляді модель авторегресії та ковзного середнього описується рівнянням:

$$\sum_{j=0}^q \varphi(j)x(n-j) = \sum_{k=0}^s \mu(k)\varepsilon(n-k), \quad (2)$$

де  $x(n)$  – значення випадкової величини  $x$ , що відповідає  $n$ -му спостереженню;  $x(n-j)$  – значення випадкової величини  $x$ , що відповідають попереднім  $j$  спостереженням ( $j = \overline{0, q}$ ;  $q = 1, 2, 3 \dots$ );  $\varphi(j)$  – параметри авторегресії;  $\varepsilon(n)$  – значення випадкової складової, що відповідає  $n$ -му спостереженню випадкової величини  $x$ ;  $\varepsilon(n-k)$  – значення випадкової складової, що відповідають попереднім  $k$  спостереженням ( $k = \overline{0, s}$ ;  $s = 1, 2, 3 \dots$ ) випадкової величини  $x$ ;  $\mu(k)$  – параметри ковзного середнього.

Якщо  $s = 0$ , то вираз (2) є рівнянням авторегресії. У цьому рівнянні кожне спостереження є лінійною комбінацією попередніх спостережень. У випадку, якщо  $q = 0$ , то вираз (2) є рівнянням ковзного середнього, а поточне спостереження є лінійною комбінацією випадкових впливів у попередні моменти часу.

Загальна модель, запропонована Боксом і Дженкінсом, включає як параметри авторегресії, так і параметри ковзного середнього, а саме: параметри авторегресії  $p$ , порядок різниці  $d$ , параметри ковзного середнього  $q$ .

При проведенні аналізу часового ряду (див. рис.1) було виявлено його нестационарність, що може бути ознакою поступового старіння виробу. Для здійснення прогнозу вихідний ряд був приведений до стаціонарного шляхом однократного диференціювання (взяття кінцевих різниць). Після прогнозу одержаного стаціонарного процесу виконано однократне підсумовування (інтегрування) для відновлення характеру зміни вихідного ряду. Підібрана модель ARIMA (1,1,1) має параметри:  $p = 1$ ,  $d = 1$ ,  $q = 1$ , що означає наявність у складі моделі одного параметра авторегресії, одного параметра ковзного середнього та проведення однократного диференціювання вихідного ряду.

Графіки результатів прогнозування диференційованого та проінтегрованого рядів представлені на рис. 2, 3.

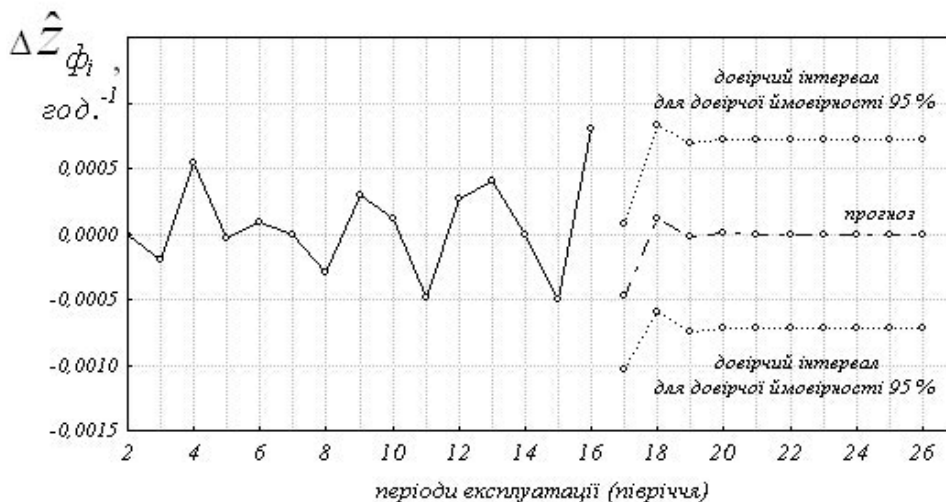


Рис. 2. Графік прогнозу значень  $\Delta \hat{Z}_{\phi}$  для диференційованого ряду

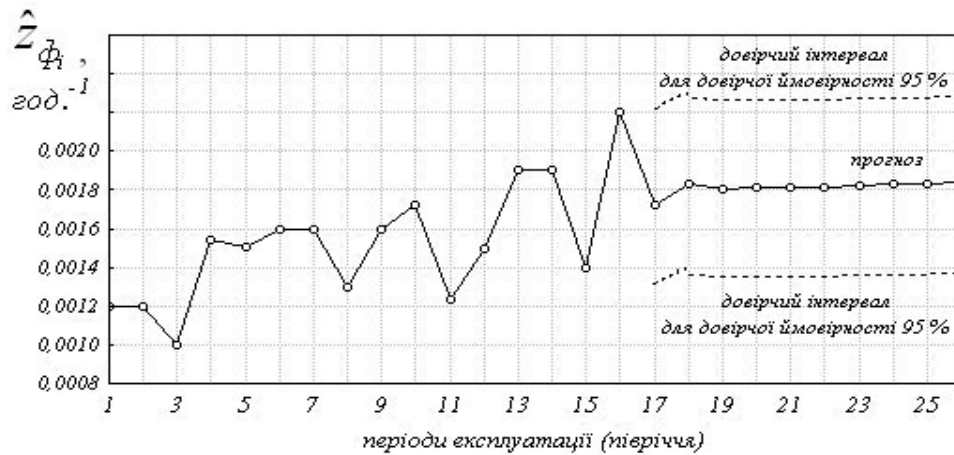


Рис. 3. Графік прогнозу значень  $\hat{z}_{\phi_i}$  для вихідного ряду

Потім була перевірена адекватність підбраної моделі. Необхідною (але недостатньою) умовою адекватності моделі є виконання вимоги обмеження коефіцієнтів  $p$ -value, що характеризують рівень довіри до обчислених параметрів моделі, величинами 0,05...0,1 [9; 10]. Це відповідає рівню довіри не менше 95...90 % відповідно. Для підбраної моделі коефіцієнт  $p$ -value менше 0,05, що свідчить про відповідність моделі сформульованій вимозі.

Подальший аналіз пов'язаний з дослідженням залишків, які представляють собою різниці значень, що спостерігали, та прогнозованих значень. Для правильно вибраної моделі характер зміни залишків схожий на білий шум: відсутні періодичні коливання, систематичні зміщення та сильні кореляції. Наявність або відсутність цих ознак перевіряється шляхом аналізу автокореляційної та часткової автокореляційної функції залишків (рис. 4, 5). Наявність значень автокореляційних функцій, що виходять за межі 95 % довірчих границь, свідчатиме про неадекватність моделі.

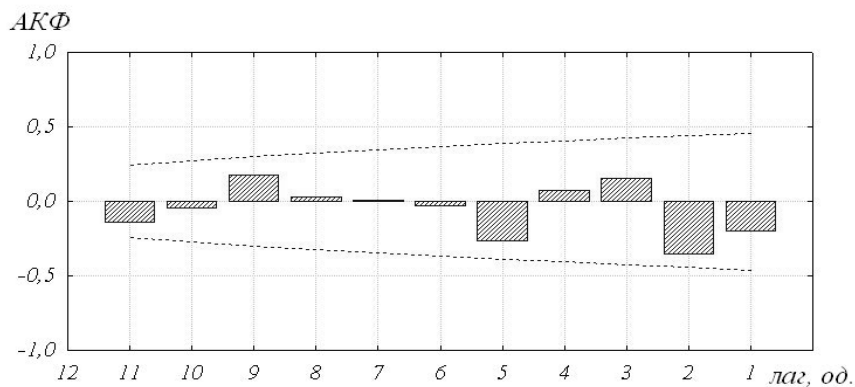


Рис. 4. Графік автокореляційної функції залишків часового ряду

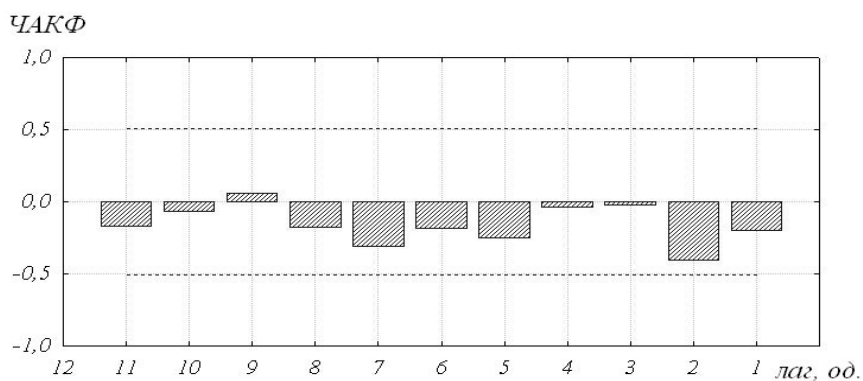


Рис. 5. Графік часткової автокореляційної функції залишків часового ряду

З графіків на рис. 4, 5 видно, що отримані оцінки лежать всередині довірчого інтервалу для нульових значень функцій, тому немає підстави вважати залишки корельованими.

Насамкінець, перевіряємо останню умову адекватності моделі: залишки повинні бути розподілені за нормальним законом. Для цього можна використати графіки квантіль-квантіль [9; 10]. Для часового ряду, що аналізуємо, відповідний графік представлений на рис. 6.

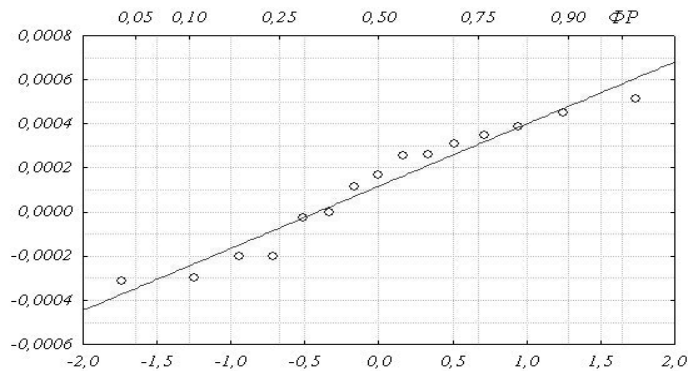


Рис. 6. Графік квантіль-квантіль залишків часового ряду

Таким чином, визначене за допомогою запропонованої процедури прогнозоване значення параметра потоку відмов може бути використано як нормативне значення показника безвідмовності у процесі подальшого статистичного контролю надійності (безвідмовності) обладнання ЛА. Застосування даної процедури також дозволяє визначати тенденцію зміни параметра потоку відмов бортового обладнання, виявляти процеси старіння за статистичними даними, що отримують під час експлуатації.

### Висновки

1. Методика, що запропонована для прогнозування безвідмовності обладнання ЛА в процесі експлуатації, ґрунтується на статистичному аналізі часових рядів з використанням моделей класу авторегресії та проінтегрованого ковзного середнього.

2. Результати прогнозування можуть бути використані у проведенні статистичного контролю надійності (безвідмовності) обладнання ЛА та можуть сприяти прийняттю обґрунтованих рішень щодо продовження експлуатації бортового обладнання ЛА поза межами встановлених термінів служби.

### Список використаних джерел

1. Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки [Текст] : тези доповідей та виступів наук.-практ. конф. / М-во оборони України, М-во освіти і науки України, Нац. авіаційний ін-т, Держ. наук.-дослід. ін-т авіації. – К. : ДНДІА, 2010. – 120 с.
2. ГОСТ 24212:80. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники [Текст] : [действующий с 1981-01-07]. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1980. – 16 с.
3. Рабочая книга по прогнозированию [Текст] / Э. А. Араб-Оглы, И. В. Бестужев-Лада, Н. Ф. Гаврилов и др.; под ред. И. В. Бестужева-Лады. – М. : Мысль, 1982. – 430 с.
4. Хеннан, Э. Многомерные временные ряды [Текст] / Э. Хеннан; пер. с англ. А. С. Холево. – М. : Мир, 1974. – 576 с.
5. Андерсон, Т. Статистический анализ временных рядов [Текст] / Т. Андерсон; пер. с англ. И. Г. Журбенко и В. П. Носко. – М. : Мир, 1976. – 756 с.
6. Гаскаров, Д. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голикевич, А. В. Мозгалевский. – М. : Сов. радио, 1974. – 224 с.
7. Абрамов, О. В. Прогнозирование состояния технических систем [Текст] / О. В. Абрамов, А. Н. Розенбаум. – М. : Наука, 1990. – 126 с.
8. Журбенко, И. Г. Стохастическое моделирование процессов [Текст] / И. Г. Журбенко, И. А. Кожевникова. – М. : МГУ, 1990. – 148 с.
9. Тюрин, Ю. П. Анализ данных на компьютере [Текст] / Ю. П. Тюрин, А. А. Макаров. – М. : Инфра-М, 2003. – 544 с.
10. Боровиков, В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов [Текст] / В. Боровиков. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.

*Стаття надійшла до редакції 02.02.2012 р.*