

УДК 519.873

*Юрій Васильович Кравченко*  
*Володимир Валерійович Ряшин*

## **ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНИЙ ПРОГНОЗ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ МЕТОДАМИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ**

### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

Практика експлуатації окремих типів літальних апаратів свідчить про невідповідність прийнятого підходу до контролю рівня надійності умовам 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 по відношенню до її певного граничного рівня. Окрім того, існуючий підхід не передбачає прогнозування відповідного показника.

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

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

Необхідність визначення технічного стану таких систем в процесі експлуатації з метою підтримання справності та готовності до застосування, значно зросла за останні роки у зв'язку з вичерпанням календарних термінів експлуатації ЛА, та обмеженням фінансових можливостей виконання капітальних ремонтів в даний час. Одним з перспективних шляхів розвитку та удосконалення технічної експлуатації ЛА є перехід на експлуатацію за технічним станом. Це у свою чергу передбачає вирішення широкого кола наукових та практичних завдань, серед яких є удосконалення методів та засобів контролю технічного стану ЛА та їх елементів [1].

Відомо, що ознаками технічного стану системи можуть бути: значення наробітку (нальоту, пробігу) або терміну служби, значення відповідних діагностичних параметрів та значення показників надійності (безвідмовності) [2]. Конструкція багатьох типів ЛА передбачає використання відповідного діагностичного

обладнання в умовах експлуатації тільки для обмеженої кількості елементів, що призводить до необхідності 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 вносить певну долю невизначеності стосовно термінів безпечної та ефективної експлуатації.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формулювання мети статті**

У науково – технічній літературі [3-7] достатньо добре описані як методи прогнозування, що засновані на моделюванні досліджуваних процесів, так і методи екстраполяції наявної інформації. Серед найбільш поширених методів 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 в процесі експлуатації обумовлена обмеженістю можливостей отримання статистичної вибірки, за багатьма факторами. Окрім цього, зазначені методи є досить трудомісткими, що знижує оперативність прогнозу. Тому, дані методи більшою мірою пристосовані для вирішення завдань наукових досліджень, ніж до умов експлуатації ЛА.

З іншого боку, найбільш простим та зручним для застосування є метод лінійної регресії, що є одним з методів екстраполяції. Але, застосування даного методу пов'язане з великою помилкою прогнозу (до 30%). Зниження помилки прогнозу при достатній оперативності та зручності процедури прогнозування, що є досить важливим для умов експлуатації ЛА, можна досягти при

використанні методів статистичного аналізу часових рядів.

Тому мета і основний зміст статті полягає у розробці підходу до прогнозування безвідмовності бортового обладнання літальних апаратів у процесі експлуатації ЛА, що базується на використанні методів статистичного аналізу часових рядів.

**Виклад основного матеріалу**

Виходячи з викладених обставин, завдання, що підлягає вирішенню, полягає в удосконаленні процедури прогнозування безвідмовності бортового обладнання літальних апаратів у процесі експлуатації. Підхід, що пропонується, базується на використанні методів статистичного аналізу часових рядів.

Більшість методів аналізу часових рядів реалізовані у статистичних пакетах типу SAS, SUSTAT, SPSS, STSC, Statistika, Minitab, WinSTAT, STADIA, ЭВРИСТА, ОЛИМП та Excel [8].

Застосування запропонованого методу проілюструємо на статистичних даних про відмови та несправності блоку логіки системи бортового контролю літаків з 2005 по 2012 рік (таблиця 1).

Оцінка фактичного значення параметру потоку відмов за і-й контрольний період (півріччя) експлуатації визначається за формулою:

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

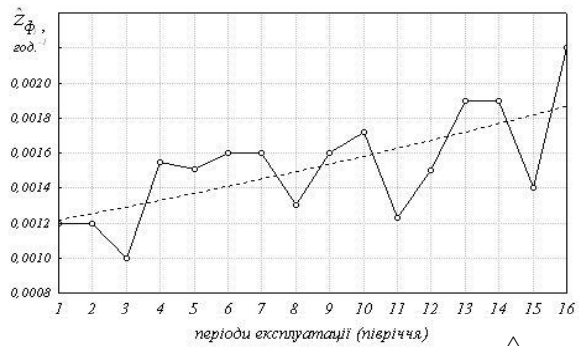
де  $n_{\phi_i}$  - фактична кількість відмов та несправностей за і-й контрольний період експлуатації, од.;  $t_{\Sigma_i}$  - сумарний наліт парку ЛА за період, год.;  $a$  - кількість однотипних виробів на одному ЛА, од.;

Таблиця 1

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

Період	2005, I	2005, II	2006, I	2006, II
$\hat{z}_{\phi_i}$ , год. <sup>-1</sup>	0,0012	0,0012	0,001	0,0015
Період	2007, I	2007, II	2008, I	2008, II
$\hat{z}_{\phi_i}$ , год. <sup>-1</sup>	0,0015	0,0016	0,0016	0,0013
Період	2009, I	2009, II	2010, I	2010, II
$\hat{z}_{\phi_i}$ , год. <sup>-1</sup>	0,0016	0,0017	0,0012	0,0015
Період	2011, I	2011, II	2012, I	2012, II
$\hat{z}_{\phi_i}$ , год. <sup>-1</sup>	0,0019	0,0019	0,0014	0,0022

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



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

Послідовність вирішення задачі прогнозування є наступною: 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 [9]. Обробка даних таблиці 1 за вказаною послідовністю дозволила обрати модель часового ряду з класу моделей ARIMA (Autoregression and Integrated Moving Average) та визначити параметри моделі.

Модель ARIMA (АРІМКС – авторегресії та проінтегрованого ковзаючого середнього) передбачає моделювання двох видів процесів: процесу авторегресії і процесу ковзаючого середнього [4, 5]. У загальному вигляді модель авторегресії та ковзаючого середнього описується рівнянням:

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

де  $x(n)$  - значення випадкової величини  $x$ , що відповідає  $n$  - му спостереженню;

$x(n-j)$  - значення випадкової величини  $x$ , що відповідають попереднім  $j$  спостереженням ( $j = 0, q; q = 1, 2, 3 \dots$ );

$\phi(j)$  – 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 ( $k = 0, s; s=1, 2, 3 \dots$ ) випадкової величини  $x$ ;

$\mu(k)$  – параметри ковзаючого середнього.

Якщо  $s = 0$ , то вираз (2) є рівнянням авторегресії. В цьому рівнянні кожне спостереження є лінійною комбінацією попередніх спостережень. У випадку, якщо  $q = 0$ , то вираз (2) є рівнянням ковзаючого 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 ковзаючого середнього, а саме, є три типи параметрів моделі: параметри авторегресії ( $p$ ), порядок різниці ( $d$ ), параметри ковзаючого середнього ( $q$ ).

При проведенні аналізу часового ряду (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 було 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 параметру авторегресії, одного параметру ковзаючого середнього, та проведення однократного диференціювання вихідного ряду.

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

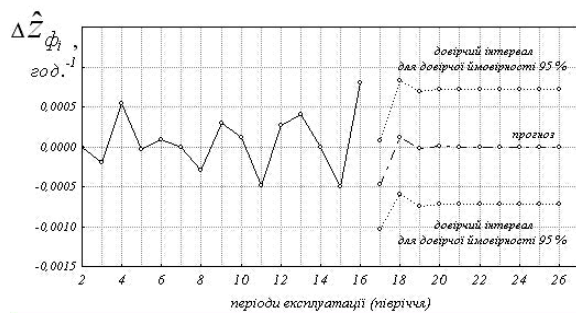


Рис. 2. Графік прогнозу значень  $\Delta Z_{\phi_i}$  для диференційованого ряду

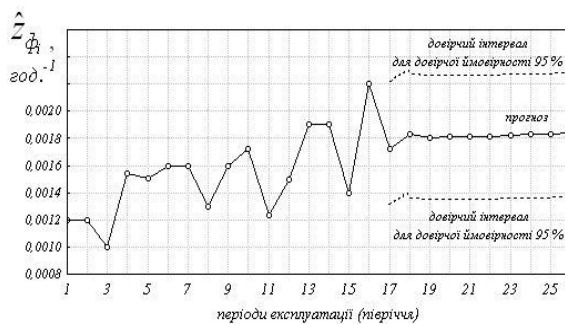


Рис. 3. Графік прогнозу значень  $Z_{\phi_i}$  для вихідного ряду

Далі, була перевірена адекватність підібраної 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 [8, 9]. Це відповідає рівню довіри не менше, ніж 95...90% відповідно. Для підібраної моделі коефіцієнт  $p$ -value менше, ніж 0,05, що свідчить про відповідність моделі сформульованій вимозі.

Подальший аналіз пов'язаний з дослідженням залишків, які представляють собою різниці значень, що спостерігались, та прогнозних значень. Для правильно обраної 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 функцій залишків (рис. 4, 5). Наявність значень автокореляційних функцій, що виходять за межі 95% довірчих границь, буде свідчити про неадекватність моделі.

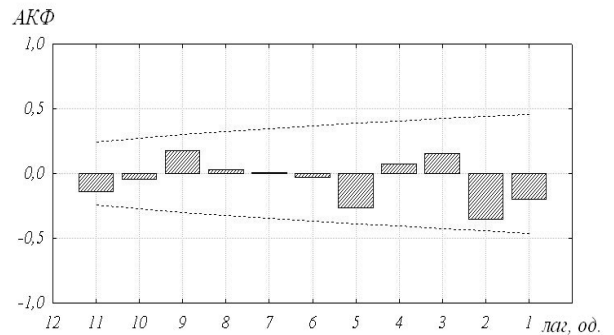


Рис. 4. Графік автокореляційної функції залишків часового ряду

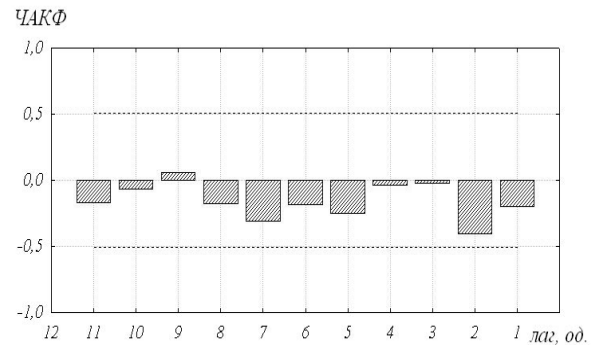


Рис. 5. Графік часткової автокореляційної функції залишків часового ряду

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

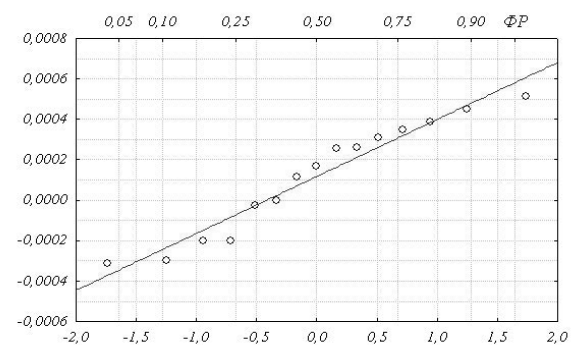


Рис. 6. Графік квантіль-квантіль залишків часового ряду

Далі перевіряється остання умова адекватності моделі: залишки повинні бути розподілені за нормальним законом. Для перевірки цієї умови можна використати графіки квантіль-квантіль [9].

Для часового ряду, що аналізується, відповідний графік представлений на рис. 6.

Таким чином, визначене за допомогою запропонованої процедури прогнозне значення параметру потоку відмов може бути використано в якості нормативного значення показника безвідмовності при подальшому здійсненні статистичного контролю надійності (безвідмовності) обладнання ЛА.

Окрім цього, застосування даної процедури дозволить визначити тенденцію зміни параметра потоку відмов бортового обладнання, виявляти процеси старіння за статистичними даними, що

отримуються у процесі експлуатації.

### Висновки

Підхід, що запропонований для прогнозування безвідмовності обладнання ЛА в процесі експлуатації, ґрунтується на статистичному аналізі часових рядів з використанням моделей класу авторегресії та проінтегрованого ковзаючого середнього. Результати прогнозування можуть бути використані при проведенні статистичного контролю надійності обладнання ЛА з метою підтримки прийняття обґрунтованих рішень щодо продовження експлуатації бортового обладнання ЛА поза межами встановлених термінів служби.

### Література

**1. Онищенко С.І.** Концепція підтримання справності та бойового потенціалу парку авіаційної техніки авіації Повітряних Сил Збройних Сил України на період до 2025 р. / С.І. Онищенко, В.В. Самулеєв, О.В. Харченко // Наука і оборона, 2011. – № 4. – С. 33. **2. Система** технического обслуживания и ремонта авиационной техники: ГОСТ 24212:80. – [Действующий с 1981-01-07]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – 16 с. **3. Рабочая** книга по прогнозированию / [Араб-Оглы Э.А., Бестужев-Лада И.В., Гаврилов Н.Ф. и др.]; под ред. И.В. Бестужева-Лады. – М.: Мысль, 1982. – 430 с. **4. Хеннан Э.** Многомерные временные ряды / Э. Дж. Хеннан; пер. с англ. А.С. Холево. – М.: “Мир”, 1974. – 576 с. **5. Андерсон Т.** Статистический анализ

временных рядов / 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 / Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. – М.: “Советское радио”, 1974. – 224 с. **7. Журбенко И.Г.** Стохастическое моделирование процессов / И.Г. Журбенко, И.А. Кожевникова. – М.: Издательство МГУ, 1990. – 148 с. **8. Тюрин Ю.П.** Анализ данных на компьютере / Ю.П. Тюрин, А.А. Макаров. – М.: “Инфра-М”, 2003. – 544 с. **9. Боровиков В.** STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / Боровиков В. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.

Статья посвящена проблеме перевода летательных аппаратов на эксплуатацию по техническому состоянию. Авторами предложен подход к прогнозированию безотказности бортового оборудования летательных аппаратов в процессе эксплуатации. Данный подход базируется на использовании методов статистического анализа временных рядов. Приведены результаты прогнозирования параметра потока отказов с использованием модели авторегрессии и скользящего среднего.

*Ключевые слова:* летательный аппарат, скользящее среднее, безотказность, параметр потока отказов.

The article is devoted to the problem of converting the military aircraft to on – condition operation. The approach to the predicting of military aircraft equipment reliability while in service is proposed. The given approach is based on use of time – series statistical analysis methods. The outcomes of failure – rate predicting by using the ARIMA combined model are given.

*Key words:* aircraft, moving average, reliability, failure rate.