

Соломенцев О.В., д.т.н.,  
Заліський М.Ю.,  
Мусієнко А.О.

## ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУР ОБРОБКИ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАСОБІВ АЕРОНАВІГАЦІЇ

*Розглянуто застосування послідовних процедур статистичного оцінювання параметрів у інженерній практиці на прикладі процесу продовження терміну служби (ресурсу) засобів аеронавігації. Виконано порівняльний аналіз трьох варіантів структур обробки даних у системах експлуатації.*

### **Вступ**

Наземні засоби аеронавігації, до яких належать наземні засоби радіотехнічного забезпечення польотів, відіграють важливу роль у процесі підтримки регулярності та безпеки польотів повітряних суден, а також ефективності функціонування підприємств цивільної авіації.

Якість функціонування наземних засобів аеронавігації забезпечує система їх експлуатації. Однією із основних складових системи експлуатації (СЕ) є технологічні процеси та операції експлуатації. До процесів в СЕ засобів аеронавігації можна віднести: процеси організації та планування робіт, сертифікаційні випробування, введення в експлуатацію, використання за призначенням, технічне обслуговування та ремонт, продовження терміну служби (ресурсу), наземні та льотні перевірки, метрологічне та матеріально-технічне забезпечення, технічна експлуатація програмних засобів тощо.

### **Постановка завдання**

Аналіз процедур обробки даних в процесах СЕ засобів аеронавігації показує, що всі процедури засновані на використанні вихідної статистики з фіксованим обсягом спостереження. У науково-технічній літературі існують також послідовні процедури статистичної обробки даних вальдівського типу, що засновані на випадковому обсязі вибірки [1–2]. Послідовні процедури статистичного оцінювання параметрів у інженерній практиці дозволяють отримати вигоду, пов'язаний зі зменшенням обсягу спостереження, ніж еквівалентні їм процедури, засновані на фіксованому обсязі вибірки для однакових рівнів показників якості обробки даних. Проте їх застосування в цивільній авіації в СЕ засобів аеронавігації недостатньо, що не дозволяє реалізувати

ти можливості подальшого підвищення якості функціонування СЕ.

Тому розглядається задача розробки та порівняльного аналізу декількох варіантів побудови структур обробки даних (СОД) на прикладі процесу продовження терміну служби (ресурсу) засобів аеронавігації із застосуванням послідовних процедур.

### **Основна частина**

Розглянемо три варіанти СОД в частині синтезу та аналізу їх ефективності. Перший варіант СОД1 характеризується набором, який сформований з урахуванням інструкції про продовження ресурсу [3]. Оператор формування даних накопичує інформацію за схемою, що відповідає класичній процедурі оцінювання. У другому варіанті СОД2 оператор формування даних накопичує інформацію за схемою типу “ковзне вікно”. Обсяг даних також є фіксованим. У третьому варіанті СОД3 оператор формування даних накопичує інформацію за схемою типу “ковзне вікно”, але на відміну від другого варіанту застосовуються послідовні процедури оцінювання параметрів функціонування засобів аеронавігації.

Вихідною статистикою для трьох варіантів СОД є дані щодо відмов конкретного засобу аеронавігації.

Кожний із варіантів СОД можна розглядати у декількох модифікаціях з урахуванням особливостей формування вибірових сукупностей для обробки даних. В одному із можливих варіантів таких модифікацій формування вибірок та прийняття рішень відбувається за роками, а в іншому варіанті – у момент виникнення відмови (пошкодження).

Під час визначення змісту СОД можна використовувати декілька підходів щодо прийняття рішень про стан засобу аеронавігації. У першому випадку відомі вимоги до показника неперервності обслуговування (НО) та алго-

ритм його визначення. Після оцінювання середнього напрацювання на відмову та середнього часу відновлення розраховуються поточні значення НО. На основі порівняння поточного значення з нормативним рівнем, встановленим вимогами, приймають рішення щодо стану процесу використання за призначенням засобу аеронавігації.

У другому випадку із рівняння для НО знаходиться порогове значення середнього напрацювання на відмову для нормативного (граничного) рівня НО. Далі розраховують поточні значення середнього напрацювання на відмову, порівнюють його з пороговим значенням та приймають відповідні рішення.

У третьому випадку розраховують накопичені сумарні ризики аеронавігаційного обслуговування та порівнюють їх з пороговим значенням, яке визначається з урахуванням щільності розподілу ймовірностей числа відмов на контрольованому інтервалі, а також приймаються відповідні рішення.

Для формалізації процесу теоретичного аналізу ефективності, формалізації процесу моделювання СЕ, розрахунків числових значень показників ефективності СЕ та її окремих елементів необхідно представити СОД у вигляді операторних схем. Процес синтезу операторної схеми СОД можна виконувати з використанням евристичного підходу, який ґрунтується на забезпеченні функціональної повноти обробки та перетворення даних щодо функціонування СЕ та її окремих елементів: для виконання дій їх необхідно спланувати; для реалізації керуючих управлінських впливів необхідно виконати попередню статистичну обробку даних та проміжні розрахунки нестатистичного характеру, пов'язаних з вирішених оптимізаційних задач тощо. Операторна структура обробки даних є уніфікованою, тобто перелік операторів та їх взаємозв'язок спрямований на формування оцінок, команд та їх реалізацію для забезпечення ефективності СЕ засобів аеронавігації. Конкретна операторна структура залежить від заданого варіанту прийнятих процедур оцінювання (СОД1, СОД2, СОД3).

На рис. 1 наведені наступні оператори:  $B_1$  – призначений для формування загальної база даних про відмови (пошкодження), а також про відновлення працездатності конкретного засобу аеронавігації;  $B_{21}$  – призначений для формування вибірки, на основі якої викону-

ється оцінка показника безвідмовності у вигляді середнього напрацювання на відмову;  $B_{22}$  – призначений для формування вибірки, на основі якої виконується оцінка показника ремонтпридатності у вигляді середнього терміну ремонту;  $A_{11}$  – призначений для формування оцінки показника безвідмовності у вигляді середнього напрацювання на відмову;  $A_{12}$  – призначений для формування оцінки показника ремонтпридатності у вигляді середнього терміну ремонту;  $Z_1$  – призначений для розрахунку показника, що характеризує процес використання за призначенням окремого засобу аеронавігації у вигляді показника безперервності обслуговування ( $НО^*$ );  $Z_2$  – призначений для розрахунку показника, що характеризує процес використання за призначенням окремого засобу аеронавігації у вигляді показника готовності ( $ЕГ^*$ );  $V_1$  – призначений для прийняття рішення о відповідності показника  $НО^*$  встановленим вимогам. Оператор виконує 2-х альтернативну класифікацію стану процесу використання за призначенням засобу аеронавігації в рамках показника  $НО^*$ . Стан  $S_1^{(1)}$  – є відповідність встановлених вимогам. Стан  $S_2^{(1)}$  – немає відповідності встановленим вимогам;  $Z_3$  – призначений для розрахунку ризиків АНО, пов'язаних з конкретним рівнем показника  $НО^*$ . Дані про результати розрахунків використовуються для моніторингу СЕ, а також для оцінки результативності процесів управління станом відповідних складових в СЕ;  $\Gamma_1$  – призначений для формування команд про керуючі впливи по відношенню до засобу аеронавігації, а також інші складові СЕ за напрямом, пов'язаним з показником  $НО^*$ . Керуючі впливи формують у випадку, коли є стан  $S_2^{(1)}$ . Тип команди обирають в залежності від рівня ризиків АНО;  $D_1$  – призначений для виконання команд щодо керуючих впливів по відношенню до засобу аеронавігації, а також інші складові СЕ за напрямом, пов'язаним з показником  $НО^*$ ;  $V_2$  – призначений для прийняття рішення о відповідності показника  $ЕГ^*$  встановленим вимогам. Оператор виконує 2-х альтернативну класифікацію стану процесу використання за призначенням аеронавігації в рамках показника  $ЕГ^*$ . Стан  $S_1^{(2)}$  – є відповідність встано-

влених вимогам. Стан  $S_2^{(2)}$  – немає відповідності встановленим вимогам;  $\Gamma_2$  – призначений для формування команд про керуючі впливи по відношенню до засобу аеронавігації, а також інші складові СЕ за напрямом, пов’язаним з показником  $EG^*$ . Керуючі впливи формуються у випадку, коли є стан  $S_2^{(1)}$ . Тип команди обирають в залежності від рівня ризиків АНО;  $D_2$  – призначений для виконання команд щодо керуючих впливів по від-

ношенню до засобу аеронавігації, а також інші складові СЕ за напрямом, пов’язаним з показником  $EG^*$ .

На рис. 1 оператори  $B_{21}$ ,  $B_{22}$ ,  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  мають певну структуру в залежності від того, яка процедура оцінювання показників надійності використовується – з фіксованим обсягом вибірки або послідовна процедура оцінювання.

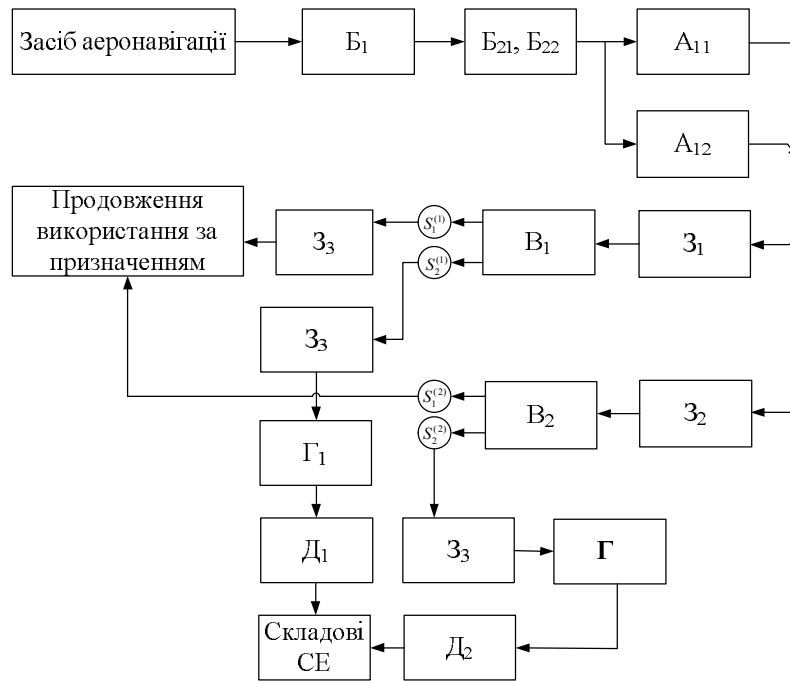


Рис. 1. Операторна схема структури обробки даних

Приведемо конкретизацію перерахованих операторів, починаючи з оператора  $B_1$ :

$$B_1(t_i; t_{Bi}) = \begin{cases} \vec{t}_N, \\ \vec{t}_{BN}. \end{cases}$$

де  $N$  – обсяг даних про відмови (пошкодження), зафіксованих за весь термін експлуатації конкретного засобу аеронавігації; масив даних  $\vec{t}_N$  характеризує напрацювання до відмов (пошкодження) конкретного засобу аеронавігації, які виникли за весь період роботи засобу аеронавігації; масив даних  $\vec{t}_{BN}$  характеризує відновлення працездатності засобу аеронавігації за весь період роботи.

Оператори  $B_{21}$ ,  $B_{22}$  для процедур оцінювання з фіксованим обсягом вибірки в СОД2 мають вигляд на  $i$ -му кроці вирішення задачі обробки даних:

$$B_{21}(\vec{t}_N / [i - n, i]) = \vec{t}_n(i),$$

$$B_{22}(\vec{t}_{BN} / [i - n, i]) = \vec{t}_{Bn}(i).$$

Оператори  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  для СОД2 мають наступний вигляд:

$$A_{21}(\vec{t}_n(i)) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_n(i)_j,$$

$$A_{22}(\vec{t}_{Bn}(i)) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{Bn}(i)_j.$$

Оператор  $Z_1$  для експоненціальної моделі напрацювань на відмову має вигляд:

$$HO^*(\tau) = \hat{K}_\tau e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_0}},$$

де  $\tau$  – інтервал, у межах якого оцінюють неперервність обслуговування.

Оператор  $B_1$  для варіанту двохальтернативної класифікації має наступний вигляд:

$$\xi = \begin{cases} 1, & \text{якщо } HO^*(\tau) \geq HO^{(0)}(\tau), \\ 0, & \text{якщо } HO^*(\tau) < HO^{(0)}(\tau), \end{cases}$$

де  $HO^{(0)}(\tau)$  – нормативний рівень неперервності обслуговування.

Оператор  $Z_2$  має вигляд:

$$E\Gamma^* = \hat{K}_\Gamma.$$

Оператор  $B_2$  для варіанту двохальтернативної класифікації має наступний вигляд:

$$\xi = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{K}_\Gamma \geq \hat{K}_\Gamma^{(0)}, \\ 0, & \text{якщо } \hat{K}_\Gamma < \hat{K}_\Gamma^{(0)}, \end{cases}$$

де  $\hat{K}_\Gamma^{(0)}$  – нормативний рівень коефіцієнту готовності.

Оператор  $Z_3$  розраховує ризик аеронавігаційного обслуговування в залежності від рівня показника  $HO^*(\tau)$ . Одним із можливих варіантів залежності ризику є експоненціальна модель, що має наступний вигляд:

$$Z_3 = e^{-\frac{HO^*(\tau)}{HO^{(0)}(\tau)}}.$$

Оператори  $\Gamma_1, \Gamma_2, D_1, D_2$  формують структурований перелік дій, що апріорно визначений у відповідності до складу та особливостей СЕ.

Для оцінки ефективності операторної схеми структури обробки даних можна застосувати аналітичний та (або) статистичний методи аналізу її функціонування. Проведемо статистичне моделювання за допомогою метода Монте-Карло процедур оцінювання в СОД1, СОД2 та СОД3. Показником ефективності обрана тривалість затримки прийняття рішення про погіршення технічного стану. Під час порівняння ефективності СОД1, СОД2 та СОД3 розраховується функція ризику.

У загальному випадку вважаємо, що функція ризику є багатопараметричною, носить доволі складний характер та є нелінійною для підкреслення необхідності реагування СЕ на значні відхилення від встановленого вимогами середнього напрацювання на відмову. Встановлені вимоги враховуються у формулі для функції ризику.

Пропонується функцію ризику на  $i$ -му кроці спостереження прийняти у наступному вигляді:

$$R(i) = e^{-\frac{\hat{T}_{0i}}{T_{02}}},$$

де  $\hat{T}_{0i}$  – оцінка середнього напрацювання на відмову на  $i$ -му кроці,  $T_{02}$  – нормативне значення середнього напрацювання на відмову. Тут меншому значенню середнього напрацювання на відмову відповідає більше значення ризику.

Для порівняння СОД1 – СОД3 пропонується формувати накопичені функції ризиків для кожної процедури і порівнювати ці значення з пороговим значенням функції ризику. У момент перевищення накопиченого ризику порогового рівня фіксується номер кроку, який у загальному випадку є випадковою величиною, що має відповідну щільність розподілу ймовірностей (ЩРІ) та може характеризуватися центральними та початковими моментами. В одному з варіантів порівняння найкращою визнається та СОД, що має менший рівень математичного сподівання номеру кроку зупину. Інший варіант передбачає розрахунок граничного рівня порогу або за допомогою ЩРІ, або на основі математичного сподівання та дисперсії.

Порогові значення функції ризику можуть бути сформовані як:

$$r_{\Pi} = n_{\Pi} e^{-\frac{m_1(T_{01})}{T_{01}}},$$

де  $n_{\Pi}$  – спостережене число відмов за інтервал навчання,  $T_{01}$  – середнє напрацювання на відмову на інтервалі навчання,  $m_1(T_{01})$  – математичне сподівання поточних значень середніх напрацювань на відмову.

Показник неперервності обслуговування залежить від середнього напрацювання на відм

ову та середнього часу відновлення засобу аеронавігації. Якщо середній час відновлення прийняти постійним, то неперервність обслуговування буде визначатися одним параметром. Тому моделювання можна виконувати відносно середнього напрацювання на відмову.

Розглянемо модель погіршення технічного стану засобу аеронавігації при експоненціальних напрацюваннях на відмову, коли інтенсивність відмов (або середнє напрацювання на відмову) змінюється стрибкоподібно у певний момент часу.

При цьому

$$T_0(t) = \begin{cases} T_{0,1}, & \text{якщо } t < t_1, \\ T_{0,2}, & \text{якщо } t \geq t_1. \end{cases}$$

На інтервалі  $(0; t_1)$  відбувається  $n_1$  відмов, а на інтервалі  $(t_1; \infty)$  –  $n_2$  відмов. Статистичне моделювання у випадку, коли  $T_{0,1} = 200$  та  $T_{0,2} = 100$ , дозволило побудувати залежність тривалості напрацювання на відмову від поточного часу (номеру відмови по порядку).

У процесі моделювання формується значення сумарних напрацювань до відмови для кожної процедури, а вибір найкращої починається, коли  $T_{\Sigma} \geq t_1$ .

Розглянемо можливі варіанти оцінювання середнього напрацювання на відмову. Нехай для першого варіанту оцінки  $\hat{T}_0$  формуються у кожний поточний момент часу під час кожної відмови, тобто

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{i} \sum_{j=i}^{n_1+n_2} t_j,$$

де  $t_j$  – тривалості поточних напрацювань на відмову.

Для другого варіанту оцінки  $\hat{T}_0$  формуються у кожний поточний момент часу завершення ковзного вікна шириною  $k_1$ , тобто

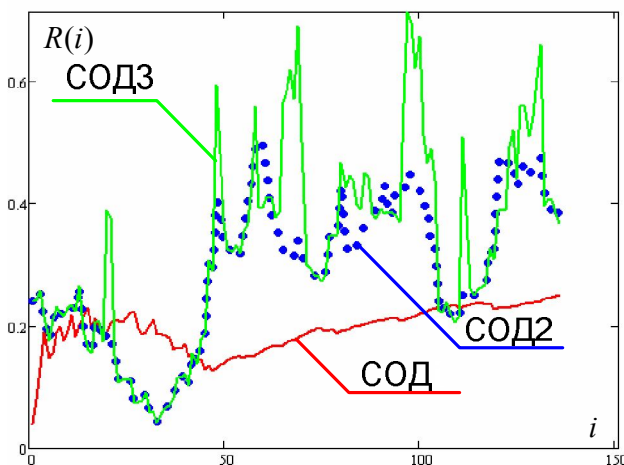
$$\hat{T}_0 = \frac{1}{k_1} \sum_{j=i}^{i+k_1-1} t_j.$$

Для третього варіанту оцінки  $\hat{T}_0$  формуються відповідно до послідовної процедури Вальда у кожний поточний момент часу всередині ковзного вікна шириною  $k_1$  з тривалістю навчання  $k_2$ . В якості правила зупини приймаємо зменшення поточного значення оцінки  $\hat{T}_0$  порогового значення  $T_{0,2}$ . Тобто

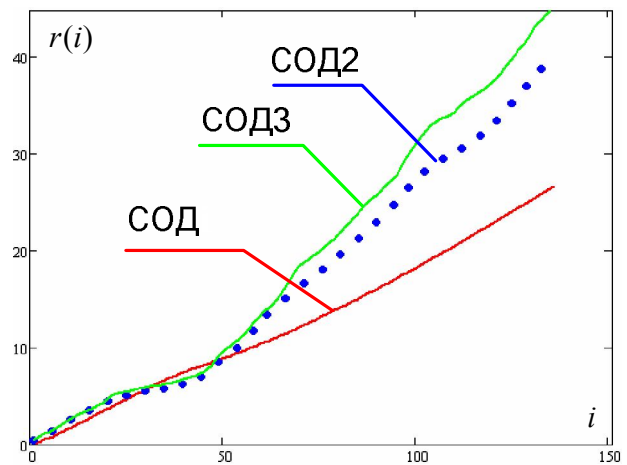
$$\hat{T}_0 = \frac{1}{i} \sum_{j=0}^i t_j,$$

де  $i$  змінюється в межах від  $k_1$  до  $k_2$ .

Приклад розрахунку функцій поточного та накопиченого ризику розглянутих структур обробки даних для однократної процедури моделювання наведено на рис. 2. Накопичений ризик визначається шляхом додавання поточних значень ризиків на кожному кроці оцінювання.



а



б

Рис. 2. Функції поточного та накопиченого ризику

Порівняння даних статистичного моделювання, наведених на рис. 2, показало, що процедура СОД3 є найбільш ефективною серед розглянутих варіантів обробки даних.

У результаті 100 процедур повторень моделювання (з вихідними параметрами  $k_1 = 15$ ,  $k_2 = 1$ ,  $T_{0,1} = 200$  та  $T_{0,2} = 100$ ) були

отримані наступні кількісні дані:  $n_1 = 49,57$ , для визначених рівнів порогів ( $r_{11} = 33,326$ ) виграш СОД3 становить майже 5,5 % у порівнянні з СОД2 та майже 19,5 % у порівнянні з СОД1 (рис. 3).

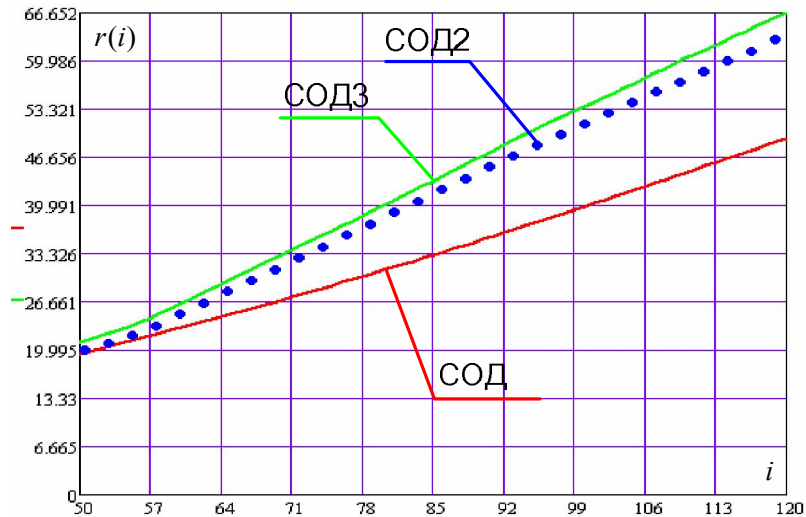


Рис. 3. Функції середнього ризику

### Висновки

Таким чином, застосування послідовної процедури оцінювання та прийняття рішень скорочує середню тривалість спостережень, що зменшує рівень матеріальних та часових витрат. Наведені результати можуть бути використані під час проектування та модернізації систем експлуатації засобів аеронавігації.

### Список літератури

1. Вальд А. Последовательный анализ / А.Вальд. – М.: Физматиздат, 1960. – 328 с.
2. Левин Б.Р. Теория надёжности радиотехнических систем / Б.Р. Левин. – М.: Советское радио, 1978. – 274 с.
3. Інструкція про порядок продовження терміну служби (ресурсу) наземних засобів РТЗ польотів і авіаційного електрозв'язку ЦА України, затверджена наказом Мінтрансу України від 11.11.2003 № 871 та зареєстрована в Мін'юсті України 02.12.03 за №1102/8423.