

# Навігація та геоінформаційні системи

УДК 629.052.3:621.396.6:681.518.5

doi: 10.26906/SUNZ.2019.5.003

С. В. Рагулін, І. О. Сироїжка

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

## АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ТА КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Зростання складності радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден і розширення кола виконуваних ними функцій призвели до того, що для управління технічним станом радіоелектронних навігаційних систем підприємства змушені виконувати значний обсяг робіт з технічного обслуговування і ремонту. Сучасні повітряні судна оснащуються цифровими пілотажно-навігаційними комплексами нового покоління, в яких всі системи мають вбудовані системи контролю і конструктивно виконуються у вигляді ряду легкозамінного блоку. Експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і ремонт радіоелектронних навігаційних систем в даний час досягають 30-40% від загальної вартості технічного обслуговування і ремонту повітряного судна, тому актуальним є питання підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту за рахунок зниження експлуатаційних витрат при збереженні льотної придатності та конкурентоспроможності повітряного судна.

**Ключові слова:** авіоніка, надійність, радіоелектронні системи, технічне обслуговування і ремонт.

### Вступ

Показники та критерії ефективності системи технічного обслуговування і ремонту. Відомі показники ефективності системи технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) можна розділити на технічні (ймовірні) і техніко-економічні (вартісні або часові).

До технічних відносяться комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності (КГ), стаціонарний коефіцієнт готовності; коефіцієнт оперативної готовності (КОГ); коефіцієнт технічного використання (КТВ). До техніко-економічних відносяться: повні експлуатаційні витрати; питомі середні витрати; питома середня прибуток тощо.

Згідно ДСТУ 2860-94 [2], коефіцієнт готовності – це ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається.

Стаціонарний коефіцієнт готовності – це значення КГ, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середній час відновлення залишаються постійними.

Коефіцієнт оперативної готовності – ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкту за призначенням не передбачається і, починаючи з цього моменту, буде виконувати необхідну функцію протягом заданого інтервалу часу.

Коефіцієнт технічного використання – це відношення математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані і в простоях, зумовлених технічним

обслуговуванням і ремонтом за той же період.

Найважливішим показником для оцінки ефективності ТО, який використовується практично всіма провідними авіакомпаніями світу, є середнє напрацювання на позаплановий ремонт (СЧНПР)

У роботах [1, 3], стандартизуючих цей показник, він визначається як відношення напрацювання системи до кількості позапланових знімачів за аналізований період, тобто для його розрахунку необхідно мати певний обсяг статистичної інформації.

В даний час відсутні аналітичні вирази для розрахунку показника СЧНПР. Цей показник розраховується усіма авіакомпаніями тільки за результатами обробки статистичних даних відмов систем за визначений період. На етапі проектування використовуються дані по значенням СЧНПР для аналогічних систем раніше розроблених ПС.

Як показує аналіз опублікованих робіт [4, 5], в більшості з них розглядається превентивне ТО, яке у вітчизняних джерелах зазвичай називається планово-попереджувальне або профілактичне.

У ряді робіт ТО включає КР одноблокової системи в дискретні моменти часу і заміну на нову систему в разі відмови. Така стратегія ТО використовується для сучасних систем авіоніки, в яких тестування здійснюється за допомогою ВСК, а забраковані ЛБ замінюються запасними з ОФ.

Як показав аналіз літератури [4-8], в більшості відомих моделей ТО одноблочних систем не враховуються показники достовірності КР.

У джерелах використовувани показники достовірності не враховують особливості багаторазового КР систем, які полягають в тому, що умовні ймовірності правильних і помилкових рішень в даний момент залежать від результатів КР в попередні моменти часу.

У роботах [9, 10] наведені вирази для таких показників як коефіцієнт технічного використання і

коефіцієнт готовності, які враховують особливості багаторазового КР:

$$K_{TB} = \frac{(1-\beta)[1-\exp(-\lambda\tau)]}{\lambda\{(\tau+t_{KP})[1-\beta\exp(-\lambda\tau)]+(1-\beta)[t_{XB}\alpha\exp(-\lambda\tau)+t_{PB}\exp(-\lambda\tau)]\}}; \quad (1)$$

$$K_G = \frac{(1-\beta)[1-\exp(-\lambda\tau)]}{\lambda\{\tau[1-\beta\exp(-\lambda\tau)]+(1-\beta)[t_{XB}\alpha\exp(-\lambda\tau)+t_{PB}\exp(-\lambda\tau)]\}}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – умовна ймовірність "хибної відмови" при КР ЛБ на стоянці ПС у базовому аеропорту;

$\beta$  – умовна ймовірність "невиявленої відмови" при КР ЛБ на стоянці ПС у базовому аеропорту;

$\lambda$  – інтенсивність раптових відмов ЛБ;

$\tau$  – середній наліт ПС між двома сусідніми стоянками в базовому аеропорту;

$t_{KP}$  – середня тривалість КР;

$t_{XB}$  – середня тривалість "хибного відновлення" ЛБ на ЗВ або в центрі ТОіР;

$t_{PB}$  – середня тривалість "правильного відновлення" ЛБ на ЗВ або в центрі ТОіР.

При виведенні даних виразів експлуатація ЛБ розглядалася на інтервалі напрацювання  $(0, T_p)$ , де  $T_p$  – призначений ресурс, і було прийнято припущення про нескінченність інтервалу планування ТО, тобто  $T_p = \infty$ .

Крім того, показники (1) і (2) не враховують зовнішній прояв відмов і структуру резервування РЕНС з точки зору надійності.

У деяких роботах [6] розглядаються показники надійності на кінцевому інтервалі часу експлуатації, однак вони не враховують вплив показників достовірності КР.

У розглянутих вище роботах не розглядаються показники безвідмовності періодично контрольованих систем, що впливають на безпеку польотів. В якості такого показника безвідмовності в статті пропонується використовувати апостеріорну ймовірність безвідмовної роботи періодично контрольованої невідновлювальної одноблокової системи. Однак цей показник можна використовувати тільки для невідновлювальних РЕНС.

У роботі [10] запропонований показник безвідмовності невідновлювальної одноблокової системи у вигляді експлуатаційної ймовірності безвідмовної роботи (ЕЙБР). Під ЕЙБР розуміється ймовірність безвідмовної роботи ЛБ на інтервалі напрацювання  $(t_k, t)$  з урахуванням того, що в моменти  $t_1, t_k$  проводилось ТО, що включало в себе експлуатаційний контроль і відновлення забракованих ЛБ. При експоненційному законі напрацювання на відмову цей показник має наступний вигляд:

$$P_c = (kt_{II}, t) = \sum_{j=0}^{k-1} \left( P_c(jt_{II}) \exp(-\lambda(t-jt_{II})) \cdot (1-\alpha)^{k-j} \right) + P_c(kt_{II}) \exp(-\lambda(t-kt_{II})), \quad (3)$$

$$kt_{II} \leq t \leq (k+1)t_{II},$$

де  $P_c(jt_{II})$  – ймовірність зняття ЛБ в базовому аеропорту, обумовлена як ймовірність того, що ЛБ буде забракований при КР за допомогою ВСК;

$t_{II}$  – середня тривалість між вильотом і посадкою ПС у базовому аеропорту.

Цей показник отриманий для нескінченного інтервалу часу планування ТО і має ті ж недоліки, що й показники (2), (3).

Літературні джерела [3] присвячені дослідженню паралельних, мажоритарних та комбінованих структур резервування з точки зору надійності, проте отримані в них показники не враховують достовірності засобів контролю. У роботі [11] розглядаються моделі для оцінки показників достовірності різних алгоритмів контролю при резервуванні систем, проте отримані в них показники не дозволяють оцінювати ефективність експлуатації РЕНС на кінцевому періоді експлуатації і не враховують особливості багаторазового КР і періодичність контролю. Крім того вони не враховують вплив явних і прихованих відмов на ефективність експлуатації.

Показники надійності технічних і радіоелектронних систем з урахуванням явних і прихованих відмов розглянуті в роботі [6], однак вони не враховують достовірність засобів контролю.

Таким чином, як показує аналіз особливостей експлуатації резервованих РЕНС, показники ефективності повинні поряд з характеристиками безвідмовності враховувати не тільки кратність, а й структуру резервування систем.

Крім того, показники ефективності резервованих РЕНС повинні бути чутливі до характеристик достовірності експлуатаційного КР, достатності системи забезпечення запасів і встановлювати аналітичний взаємозв'язок з параметрами технологічного процесу ТОіР.

В якості вартісних показників ефективності в літературі використовуються: наведені витрати, середні експлуатаційні витрати (втррати); питомі середні експлуатаційні витрати (втррати); питомий середній прибуток; наведені середньорічні витрати тощо.

У роботі [10] пропонується здійснювати оцінку ефективності різних стратегій ТОіР по комплексному критерію мінімуму середньорічних наведених витрат:

$$C = C_E + E_{II}K, \quad (4)$$

де  $C_E$  – середньорічні експлуатаційні витрати;

$K$  – капітальні вкладення процес експлуатації;

$E_{II}$  – нормативний термін окупності капітальних вкладень.

У перерахованих роботах отримано вирази для складових цього показника, що дозволяють встановити взаємозв'язок між основними ймовірностями і вартісними характеристиками процесу ТОiP, а також капітальними вкладеннями в НАСК і ОФ. Однак вони отримані при тих же обмеженнях, що і показники (1) і (2). Крім того, в них не враховується показник СЧНПР.

Як показано в літературних джерелах [12], в даний час використання наведених витрат для оцінки ефективності інвестицій та проєктів недоцільно, оскільки відсутнє державне нормування нормативного терміну окупності капітальних вкладень, який задавався єдиним нормативом для всіх галузей народного господарства.

Крім того, при використанні наведених витрат не враховується фактор часу в оцінці інвестицій.

Процес експлуатації ПС безпосередньо пов'язаний з капітальними вкладеннями в закупівлю наземних засобів експлуатаційного контролю і формування ОФ РЕНС.

Тому критерії для оцінки ефективності повинні враховувати ефективність капітальних вкладень (інвестицій).

В даний час відомі наступні інтегральні показники ефективності інвестицій [12]:

- чистий дохід (Net Value - NV);
- чистий дисконтований дохід (Net Present Value - NPV);
- внутрішня норма прибутковості (Internal Rate of Return - IRR);
- індекси прибутковості витрат та інвестицій;
- дисконтований термін окупності (Payback Period).

Ці показники є узагальненими і їх доцільно використовувати для оцінки ефективності інвестицій на самому верхньому рівні для всієї авіакомпанії в цілому. Однак однією зі складових для кожного показника неодмінно будуть експлуатаційні витрати.

У роботі [6] для оцінки ефективності експлуатації технічних систем широко використовуються показники у вигляді:

- повних розрахункових (очікуваних) витрат TEC (total expected cost), повних експлуатаційних витрат за період життєвого циклу TLOC (total lifetime operating costs);
- у вигляді повних розрахункових експлуатаційних витрат за період життєвого циклу (ПЕВ).

Показник у вигляді повних розрахункових (очікуваних) витрат TEC розглянуто в роботах [6] запропонований для випадку проведення періодичного КР в моменти часу на нескінченному інтервалі планування технічного обслуговування при довільному законі розподілу напрацювання на відмову блоку:

$$TEC(T_1, T_2, \dots) = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{T_k}^{T_{k+1}} [c_1(k+1) + c_2(T_{k+1} - t)] dF(t) + c_3, \quad (5)$$

де  $F(t)$  – функція розподілу напрацювання на відмову блоку;

$\bar{n}_1$  – середня вартість одного КР;

$\bar{n}_2$  – середня вартість втрат за період між відмовою і наступним КР, при якому він виявляється (втрати через приховані відмови);

$c_3$  – середня вартість заміни блоку, що відмовив.

У цих же роботах розглядається вартісний показник на кінцевому інтервалі планування ТО причому КР проводиться через певні періоди часу  $kT$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ),  $NT \equiv S$ :

$$\begin{aligned} TEC(N) &= \sum_{k=0}^{N-1} \int_{kT}^{(k+1)T} (c_1(k+1) + c_2((k+1)T - t)) dF(t) + \\ &+ c_1 N \bar{F}(NT) + c_3 = \quad (6) \\ &= \left( c_1 + \frac{c_2 S}{N} \right) \sum_{k=0}^{N-1} \bar{F}\left(\frac{kS}{N}\right) - c_2 \int_0^S \bar{F}(t) dt + c_3, \\ &N = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Показники (5) і (6) не враховують показників достовірності контролю і зовнішній прояв відмов. Використання цих показників для оцінки ефективності експлуатації РЕС важко, оскільки вони не враховують особливості технологічного процесу ТОiP РЕС, витрати на виконання операцій ТО і особливості діагностичного забезпечення. Вартісний показник повинен також враховувати капітальні вкладення в НАСК і ОФ.

Тому ці показники повинні бути вдосконалені для практичного використання при оцінці ефективності експлуатації РЕС ПС.

На підставі проведеного огляду і аналізу показників ефективності системи ТОiP можна зробити такі висновки:

- у більшості математичних моделей не враховуються показники достовірності КР. А там, де вони використовуються, не враховуються особливості багаторазового КР РЕНС в процесі експлуатації, яка полягає в тому, що умовні ймовірності рішень в даний момент залежать від результатів попередніх КР;

- відсутні математичні моделі ТО, в яких одночасно враховувались би показники безвідмовності, ремонтпридатності РЕНС, достовірності багаторазового експлуатаційного контролю, його тривалості, а також вплив структури резервування РЕНС з точки зору надійності;

- відомі показники, що враховують достовірність багаторазового КР, отримані при допущенні про нескінченному інтервалі часу планування ТО;

- відсутні імовірнісні показники ефективності ТО, що дозволяють враховувати зовнішній прояв відмов, тобто інтенсивності виникнення як прихованих, так і явних відмов;

- відсутні показники, що дозволяють оцінювати комплексні показники надійності і безвідмовності

РЕНС протягом польоту ПС з урахуванням зовнішнього прояву відмов на кінцевому і нескінченному інтервалах часу;

- в даний час відсутній комплексний техніко-економічний показник, що дозволяє встановлювати взаємозв'язок між основними ймовірностями і варті-

сними характеристиками процесу ТОiP, а також обсягом капітальних вкладень в НАСК і ОФ;

- відомі вартісні показники ефективності експлуатації не чутливі до середнього часу напрацювання РЕНС на достроковий зйом з борту ПС (СЧНПР).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Statistical management and modeling for demand of spare parts / [ E. Ferrari, A. Pareschi, A. Regattieri, A. Persona] // Springer Handbook of Engineering Statistics: Springer London. – 2006. – P. 905–929.
2. Воробьев В. Г. Техническое обслуживание и ремонт авиационных электросистем и пилотажно – навигационных комплексов : учебник / В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов. – М. : Унив. кн., 2007 – 470 с.
3. Глухов В. В. Выбор стратегий промышленного предприятия / В. В. Глухов, А. В. Демидов. – СПб. : Северная звезда, 2002. – 246 с.
4. Емельянов В. Е. Испытания и эксплуатация авиационной и ракетно–космической техники. Транспортное радиооборудование: учеб. пособие / В. Е. Емельянов. – М.: МГТУ ГА, 2008. – 70 с.
5. Емельянов В. Е. Техническая эксплуатация авиационного РЭО: Основные вопросы теории / В. Е. Емельянов. – М.: МГТУ ГА, 2000. – 162 с.
6. Живетин В. Б. Риски и безопасность авиационных систем : анализ, прогнозирование, управление / В. Б. Живетин. – М. : Изд-во ИПР, – 2006. – 310 с.
7. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
8. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
9. Конахович Г. Ф. Оценка влияния функциональных отказов бортовых радиоэлектронных систем на безопасность и регулярность полетов / Г. Ф. Конахович, И.А. Мачалин, В. Г. Потапов, О. П. Ткалич // Матеріали IV Міжнар. НТК “Авіа–2002”. – К.: НАУ, 2002. – Т.2. – С.11.67–11.69.
10. Конахович, Г. Ф. Аппроксимация одного класса случайных процессов в задачах контроля радиоэлектронных систем// Матеріали IV Міжнародної НТК [ “Авіа–2002” / Г. Ф. Конахович, И. А. Мачалин, О. П. Ткалич. – К.: НАУ, 2002. – Т2. – С. 67–69.
11. Макаров В. М. Логистика. Управление запасами в логистических системах / В. М. Макаров. – СПб. : Изд-во Политехи. Ун-та, 2005. – 97 с.
12. Мачалин И.А. Оптимальные задачи управления запасами систем авионики / и. А Мачалин // Матеріали VII Міжнар. НТК “Авіа–2006”. – К.:НАУ,– 2006.–С. 12.47–12.51.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К. С. Козелкова,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 27.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

### Анализ показателей и критериев эффективности системы технической эксплуатации радиоэлектронных навигационных систем

С. В. Рагулин, И. А. Сыроежка

Возрастание сложности радиоэлектронных навигационных систем воздушных судов и расширение круга выполняемых ими функций привели к тому, что для управления техническим состоянием радиоэлектронных навигационных систем предприятия вынуждены выполнять значительный объем работ по техническому обслуживанию и ремонту. Современные воздушные суда оснащаются цифровыми пилотажно-навигационными комплексами нового поколения, в которых все системы имеют встроенные системы; контроля и конструктивно выполняются в виде ряда легкозаменяемого блока. Эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и ремонт радиоэлектронных навигационных систем в настоящее время достигают 30–40% от общей стоимости технического обслуживания и ремонта воздушного судна, поэтому актуальным является вопрос повышения эффективности системы технического обслуживания и ремонта за счет снижения эксплуатационных расходов при сохранении летной годности и конкурентоспособности воздушного судна.

**Ключевые слова:** авионики, надежность, радиоэлектронные системы, техническое обслуживание и ремонт.

### Analysis of indicators and system performance criteria technical operation of electronic navigation systems

S. Ragulin, I. Syroizhko

The increasing complexity of aircraft electronic navigation systems and the expansion of the range of functions performed by them have led enterprises to perform a significant amount of maintenance and repair work to manage the technical state of radio electronic navigation systems. Modern aircraft are equipped with a new generation of digital navigation and navigation systems, in which all systems have integrated systems; control and structurally performed as a series of easily replaceable unit. Maintenance costs for maintenance and repair of electronic navigation systems currently reach 30–40% of the total cost of maintenance and repair of the aircraft, therefore, the urgent issue is to increase the efficiency of the maintenance and repair system by reducing operating costs while maintaining airworthiness and competitiveness the aircraft.

**Keywords:** avionics, reliability, radio-electronic systems, maintenance and repair.