

Контроль космічного та повітряного простору

УДК 621.865.1+5197

doi: 10.26906/SUNZ.2020.2.003

С. В. Гаєвський¹, С. М. Балакірева², І. П. Кулаков³

¹ Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

² Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

³ Командування Сил Логістики Збройних Сил України, Київ

РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНИХ ПОЛОЖЕНЬ З РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ЛІТАКА

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси функціонування радіоелектронної системи сучасного літака, її комплектуючих елементів та функціональних вузлів як об'єкта визначення та розрахунку залишкового ресурсу. **Метою** є проведення аналізу існуючого методичного апарату, що застосовується для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака та пошуку шляхів його вдосконалення. **Завдання:** Розробити загальні положення по розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака. Аналізованими **методами** є: розрахунково-експериментальні методи обчислення надійності, залишкового ресурсу та потоку відмов радіоелектронної системи літака. Отримані такі **результати**. Розроблено ієрархічну схему розрахунку типу дерево: "радіоелектронна система літака – функціональна система – функціональний вузол (блок) – комплектуючий виріб", процедуру розбиття схемних позицій на невідновлювані та відновлювані об'єкти. **Висновки.** Сформульовано загальні положення по розрахунку параметра потоку відмов та оцінки технічного стану радіоелектронної системи літака для вирішення завдань продовження ресурсів.

Ключові слова: залишковий ресурс, літак, показник, продовження терміну служби, радіоелектронна система, технічний стан.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Науково-технічний прогрес і пов'язане з ним вдосконалення елементної бази істотно змінюють характер експлуатації та технічного обслуговування радіоелектронних систем (РЕС) сучасних літаків. Широке застосування апаратури виготовленої з використанням мікроелектронних компонентів, впровадження сучасних цифрових технологій з високим ступенем інтеграції робить проблематичним застосування існуючого науково-методичного апарату для розрахунку залишкового ресурсу та показників безвідмовності радіоелектронної системи літака. Вказані факти обумовлюють необхідність критичного аналізу відомих підходів та методик для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронних систем літаків в цілому та їх схемних позицій зокрема [1].

Аналіз літератури. Аналіз літератури [2-7] показав, що на сучасному етапі не в повній мірі враховано впровадження в радіоелектронну апаратуру сучасної елементної бази. Широке застосування комплектуючих елементів в мікроелектронному виконанні призводить до кардинальних змін потоків відмов в радіоелектронних системах [8-19]. Застосування відомих параметричних та імовірнісних методів оцінки надійності та безвідмовності роботи не дає змоги отримати адекватні результати [20, 23].

Даний факт тягне за собою необхідність вдосконалення існуючого науково-методичного апарату,

що застосовується для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака.

Мета статті – проведення аналізу існуючого методичного апарату, що застосовується для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака та пошуку шляхів його вдосконалення.

Основна частина

Загальні положення по розрахунку залишкового ресурсу РЕС літака. Для розв'язання задачі продовження ресурсу РЕС літака пропонується ієрархічна схема розрахунку показників залишкового ресурсу (ЗР). Радіоелектронні засоби літака, або його складові частини розбиваються на функціональні системи (ФС), кожна ФС – на функціональні вузли (ФВ), блоки, які, в свою чергу, розбиваються на комплектуючі вироби (КВ). При цьому, як правило, РЕС літака представляється чотирирівневою ієрархічною структурою типу "дерево": РЕС літака – ФС – ФВ (блоки) – КВ (рис. 1). На кожному рівні утворюються свої підсистеми відповідно до принципу декомпозиції. Така схематизація дозволяє досліджувати підсистеми окремо, використовуючи для розрахунку показники надійності їх складових частин прості дворівневі структури типу "система – елементи". При цьому, починаючи з нижнього рівня, рекурентно обчислюються характеристики надійності всіх елементів схеми від КВ до РЕС літака в цілому.

На кожному новому етапі розрахунків системою буде один з елементів схеми більш високого ієрархічного рівня, а її складові частини – елементи

найближчого нижчого ієрархічного рівня, показники надійності яких визначені на попередньому етапі. Така схема розрахунку залишкового ресурсу дозволяє більш повно розраховувати і аналізувати показники довговічності РЕС літака і більш ефективно вирішувати завдання продовження її ресурсу. Порядок розрахунків показників залишкового ресурсу та інших показників надійності РЕС літака представлені у вигляді блок-схеми розрахунку на рис. 2.

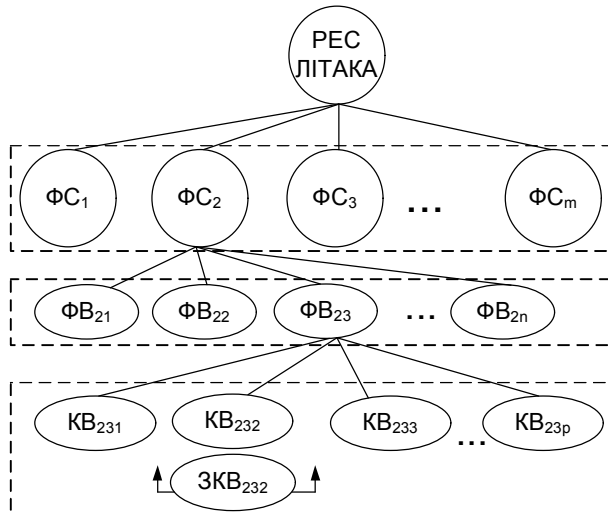


Рис. 1. Загальна структурна схема РЕС літака (ФС₁, ФС₂, ..., ФС_m - функціональні системи; ФВ₂₁, ФВ₂₂, ..., ФВ_{2n} - функціональні вузли; КВ 231, КВ 232, ..., КВ 23p - комплектуючі вироби; ЗКВ232 - запасні КВ)

Нижче викладені загальні положення по розрахунку показників залишкового ресурсу та пояснення до блок-схеми (рис. 2).

Інформаційна база (блок 1) формується на основі збору, аналізу та узагальнення наявної на початок робіт з продовження ресурсу інформації про безвідмовність, довговічність та зберігання КВ, ФВ і ФС РЕС літака. Інформаційна база ґрунтується на систематизації та узагальнених даних про надійність КВ, ФВ, ФС, отриманих на всіх етапах їх життєвого циклу у розробника, виробника та експлуатуючих організацій РЕС літака. До них можна віднести:

- систематизацію даних про умови експлуатації літака і його складових частин;
 - систематизацію даних про процеси старіння, моделі відмов, моделі досягнень граничних станів комплектуючих елементів (КЕ), КВ, ФС РЕС літака;
 - узагальнення навантажувальних режимів КВ, ФВ, ФС РЕС літака і ін.
- Додаткові дані про показники надійності КВ, ФВ, ФС отримують за результатами їх ресурсних випробувань і випробувань РЕС літака:
- попередні (доводочні) та приймальні випробування;
 - контрольні випробування, мета яких полягає в перевірці відповідності виробів вимогам ТУ, заданим рівнем надійності;
 - дослідні випробування, які охоплюють сферу експериментального вивчення виробів і факторів, що впливають на надійність КВ, ФВ РЕС літака;

- експлуатаційні спостереження, які, в свою чергу, доцільно розрізняти за видами експлуатації: опитні, підконтрольні, лідерні, штатні.

У задачі продовження ресурсів важливою інформацією є інформація про результати лідерної і підконтрольної експлуатації, а також результати досліджень випробувань, що проводяться після напруження РЕС літака призначених ресурсів і (або) термінів служби з метою визначення показників залишкового ресурсу.

Відзначимо, що до складу РЕС літака входять, як правило, ідентичні складові частини, ФС, ФВ (блоки) та КВ, що полегшує задачу оцінки показників надійності РЕС літака.

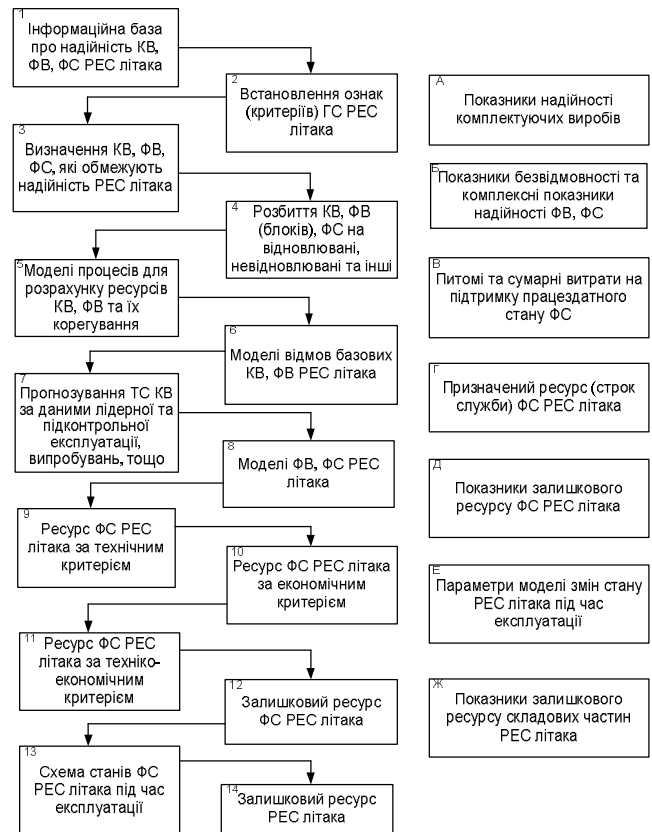


Рис. 2. Блок-схема розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака

Для розрахунку показників довговічності РЕС літака необхідно знати ознаки граничних станів (ГС). Встановлення чітких ознак граничних станів РЕС літака (блок 2) - обов'язковий елемент не тільки методики розрахунку показників залишкового ресурсу, але і експлуатації літака.

Аналіз даних експлуатаційної надійності РЕС літака показує, що у кожного літака в певних умовах експлуатації при фіксованому напруженні є обмежене число КВ, які частіше за інших відмовляють. Саме ці вироби, в основному, визначають матеріальні та трудові витрати на підтримку літака в працездатному стані. Такі елементи отримали назву "обмежуючих надійність", або критичних по надійності. Із загальної кількості КВ РЕС літака близько 6% (до 10%) мають терміни служби менше, ніж літак, але тільки близько 0,5% (до 1%) з них є критичними по надійності.

Виявлення КВ, "обмежуючих надійність" (блок 3), має принципове значення для вдосконалення методів розрахунку надійності, зокрема, показників ЗР, з наступних причин:

- дозволяє скоротити обсяг обчислень і випробувань;

- при малих обсягах випробувань, невизначеності апріорних даних про ресурси всіх КВ, ФВ РЕС літака дозволяє забезпечити прийнятну точність розрахунків і оцінок показників залишкового ресурсу.

Розрахунки показників довговічності доцільно проводити з урахуванням проведених відновлень, технічних обслуговувань, поточних ремонтів РЕС літака. У зв'язку з цим необхідне розбиття КВ, ФВ (блоків), ФС РЕС літака на відновлювані об'єкти з повними, мінімальними або неповними відновленнями, контрольовані періодично або (та) у безперервний спосіб, і невідновлювані об'єкти (блок 4).

Далі для відомого розбиття КВ, ФВ (блоків) на відновлювані і невідновлювані об'єкти необхідне застосування відомих моделей надійності, або розробка нових і їх коригування на початок робіт з продовження ресурсів (блок 5).

Відомі розрахункові математичні моделі дозволяють визначити показники надійності в одному з елементів КВ або виробу в цілому, якщо комплектуючий виріб відмовляє через один деградаційний процес. Однак, для більшості КВ, ФВ характерний перебіг декількох типів деградаційних процесів, що призводять до відмови. У цих випадках спроби розрахувати ресурс КВ, виділивши тільки один з деградаційних процесів, як правило, не дають позитивних результатів. Удосконалення методів розрахунку ресурсу КВ можливе на основі аналізу причинно-наслідкових передумов і провісників відмов і подальшій розробці моделі відмов (блок 6).

Аналіз результатів спостережень за відмовами елементів, КВ в експлуатації і можливих схем виникнення відмов елементів, показує, що в основу моделей відмов елементів, КВ можуть бути покладені такі типи залежностей між деградаційними процесами:

- деградаційні процеси, що протікають в різних елементах комплектуючих виробів, призводять до виникнення незалежних відмов;

- деградаційні процеси $\xi_i(t)$, що не приводять до відмови комплектуючих виробів при досягненні граничних станів, є причинами виникнення інших процесів $\eta_i(t)$, які призводять до відмов;

- деградаційні процеси, що призводять до відмов, розвиваються в залежності від того, чи досягають певного стану інші деградаційні процеси, що не приводять до відмов.

На підставі вищевикладеного можна сформулювати основні етапи методики розрахунку ресурсу КВ РЕС літака:

- виявлення КВ (або так званих "схемних позицій"), які повинні піддаватися розрахунку на довговічність. Збір інформації про їх надійності;

- розбиття комплектуючих виробів на невідновлювані та відновлювані із зазначенням глибини відновлення;

- визначення переважаючих видів деградаційних процесів, вибір відповідних розрахункових моделей;

- визначення вихідних даних для розрахунку показників довговічності комплектуючих елементів, комплектуючих виробів;

- формування моделей ресурсу КВ, оцінка показників ресурсу КВ, їх коригування за даними лідерної та підконтрольної експлуатації, а також за результатами технічних оглядів після вироблення призначеного ресурсу і (або) досягнення призначеного терміну служби. Крім цього при проведенні розрахунків повинні використовуватися моделі базових (основних) КВ, ФВ, ФС РЕС літака (блоків), їх несучих конструкцій, струмопровідних елементів.

При цьому до числа базових необхідно відносити вузли, що визначають ресурсні відмови, в тому числі струмопровідні елементи, несучі конструкції, захисні покриття та ін. Для розрахунків показників довговічності ФВ і ФС РЕС літака використовують відомі або розробляють нові моделі відмов (блок 8).

Розглянемо тепер наступні етапи пропонованої схеми розрахунку показників ЗР РЕС літака. Згідно блок-схеми розрахунку (рис. 2) наступний етап полягає в прогнозуванні потоку відмов КВ, ФВ, ФС РЕС літака (блоки 7, 8). При прогнозуванні потоку відмов ФВ, ФС (блок 8) повинні враховуватися основні особливості формування експлуатаційного потоку відмов і відновлень КВ РЕС літака. Дані особливості обумовлені різними рівнями їх безвідмовності, проведеними при експлуатації відновленнями різної глибини (повними, неповними і мінімальними), кінцевим числом відновлень певних схемних позицій РЕС літака, наявність усічених потоків відмов, обумовлених проведеними капітальним, середнім ремонтом; необхідністю врахування віку КВ і ін. Важливим при прогнозуванні технічного стану КВ є використання крім даних підконтрольної і лідерної експлуатації літака результатів проведення випробувань з лідерними виробами, які виробили певні ресурси або досягли призначених термінів служби.

Наступні етапи розрахунку – визначення ресурсу ФС РЕС літака за технічним (блок 9) і економічним (блок 10) критеріями. Для реалізації цього етапу проводяться розрахунки параметра потоку відмов, нестационарного коефіцієнта готовності, і, крім цього, розрахунки витрат на поточні ремонти, технічне обслуговування (ТО) (питомі, сумарні витрати та ін.) (Блок В).

Для знаходження ресурсу ФС РЕС літака з технічного критерієм можуть використовуватися такі показники: параметр потоку відмов $\omega_{ci}(t)$, нестационарний коефіцієнт готовності, або інші показники граничного стану. При цьому під ресурсом РЕС літака за технічним критерієм розуміється сумарне напруження до моменту часу, коли значення параметра потоку відмов $\omega_{ci}(t)$ (або нестационарного коефіцієнта оперативної готовності $K_{e\,ci}(t, t_{\text{оп}})$) досягне гранично допустимої величини $\omega_{\text{нпм}\,i}(t)$ (або знизиться до гранично допустимої величини $K_{\text{дон}\,i}(t)$).

Під ресурсом РЕС літака за економічним критерієм розуміється такий ресурс, при якому досягається мінімум питомих витрат на набуття та підтримання РЕС в працездатному стані, тобто мінімум функції

$$C(t) = \frac{C_{\Sigma}(t)}{t}, \quad (1)$$

де $C_{\Sigma}(t)$ – сумарні витрати на покупку і технічну експлуатацію РЕС літака за напрацювання t .

Основна складова частина літака, або окремі ФС РЕС літака підлягають ремонту, якщо її базові (основні) частини підлягають ремонту (або заміні), що вимагає розбирання ФС, причому працездатність ФС, або РЕС літака в цілому не може бути відновлена поточним ремонтом, або її відновлення поточним ремонтом економічно недоцільне. Отже, критерій досягнення граничного стану ФС РЕС літака і РЕС літака в цілому є техніко-економічним (блок 11), тобто випадкову величину ресурсу до граничного стану можна записати у вигляді

$$R = \min(R_m, R_e), \quad (2)$$

де R_m, R_e – випадкові ресурси ФС за технічним та економічним критеріями.

З (2) випливає, що функцію розподілу ресурсу i -ї ФС $F_{ci}(R)$ можна знайти на основі відомих функцій розподілу ресурсів за технічним $F_{mi}(R)$ та економічним $F_{ei}(R)$ критеріями:

$$F_{ci}(R) = 1 - [1 - F_{mi}(R)][1 - F_{ei}(R)].$$

При розрахунку витрат можна виділити питомі (диференціальні) і сумарні витрати на підтримку працездатності і заданого рівня надійності ФС РЕС літака. Змінні витрати на поточний ремонт ФС включають витрати на запасні елементи, трудові витрати і матеріали і можуть бути представлені у вигляді питомих (диференціальних) $\tilde{N}_o(t)$ або сумарних $C_{\Sigma}(t)$ витрат:

$$\begin{aligned} C_{\delta i}(t) &= K_i \sum_{j=1}^{N_i} \omega_{ji}(t) C_j, \\ C_{\Sigma}(t) &= \sum_{i=1}^M C_{\delta i}(t) \Delta t, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\omega_{ji}(t)$ – параметр потоку відмов j -го КВ на інтервалі напрацювання $(t, t + \Delta t)$; C_j – оптова ціна j -го КВ; N_i – кількість КВ, що лімітують надійність i -ї ФС; K_i – коефіцієнт, що враховує співвідношення між витратами на запасні елементи і іншими витратами при поточному ремонті (трудова витрати, матеріали, витрата ресурсу ФС на поточний ремонт).

Уточнимо поняття питомих і диференціальних витрат, які визначаються в результаті поділу витрат

на напрацювання РЕС і мають однакову розмірність. Якщо розподіл витрат проводиться на інтервал напрацювання РЕС літака, то такі витрати слід вважати диференціальними. Зауважимо, що диференціальні витрати можуть бути отримані на підставі диференціальних залежностей, наприклад, за допомогою параметра потоку відмов. Якщо розподіл витрат проводиться на сумарне напрацювання РЕС, то витрати будемо відносити до питомих. Диференціальні і питомі витрати тотожні тільки в разі лінійної залежності цього показника. Співвідношення (1) для питомих витрат ФС можна представити через диференціальні витрати

$$C_i(t) = \frac{C_{0i} + \int_0^t C_{\delta i}(\tau) d\tau}{t},$$

де C_{0i} – ціна i -ї ФС.

За техніко-економічним критерієм розраховуються (і коригуються в процесі експлуатації) призначені терміни служби (ресурс) ФС РЕС літака і РЕС літака в цілому (блок Г). Далі при встановлених величинах призначених ресурсів (або термінів служби) ФС розраховуються показники залишкових ресурсів ФС, ФВ, блоків РЕС літака (блок 12). Найповнішою характеристикою ЗР є функція розподілу ЗР; найбільш часто проводяться розрахунки середнього ЗР, рідше – середнього квадратичного відхилення ЗР, для високо відповідальних виробів рекомендується розраховувати гамма-процентний ЗР (блок Д). Більш детально показники ЗР і основні розрахункові співвідношення розглянуті в розділі 3.

Після розрахунку показників ЗР ФС будеться нова або розглядається відома ймовірна схема станів РЕС літака в експлуатації (блок 13), стосовно якої проводиться розрахунок показників ЗР РЕС літака.

Нижче більш докладно розглядаються окремі фрагменти в представленій схемі розрахунку (рис. 2) показників залишкового ресурсу РЕС літака, які або не розглядаються в науково-технічній літературі, або не розроблені досить повно для проведення розрахунків показників ЗР.

2. Загальні положення щодо оцінки технічного стану РЕС літака і обґрунтування ознак граничних станів для вирішення завдань продовження ресурсів (термінів служби). Рішення задач експлуатації РЕС літака, в тому числі завдань продовження ресурсу, пов'язане з необхідністю визначення таких технічних і граничних станів: справний, працездатний і неграничний, непрацездатний і неграничний, граничний.

Для підтримки працездатності РЕС літака і заданого рівня надійності необхідно на місцях експлуатації визначати не тільки справність або працездатність об'єкта, але і можливість його експлуатації на заданому інтервалі (наприклад, інтервалі продовження). Рішення задач продовження ресурсів вимагає деталізації граничних станів РЕС літака. Вважається за доцільне для вирішення завдань продовження ресурсів визначати наступні види граничних станів (ГС):

– граничний стан 1 (ГС1) – непрацездатний або працездатний виріб з неприпустимим зниженням

ефективності експлуатації. Ремонт силами і засобами експлуатуючої організації неможливий, можливе відновлення працездатності та ресурсу на місцях експлуатації із залученням виїзних ремонтних бригад ремонтних підприємств. Трудомісткість ремонту визначається обмеженим обсягом заміни блоків, вузлів, які швидко зношуються, та порівнянню з сумарною трудомісткістю ТО і ремонту за 1 рік експлуатації. При цьому запас ресурсу виробу після ремонту забезпечує продовження експлуатації на 3-5 років;

– граничний стан 2 (ГС2) – непрацездатний або працездатний, але граничний стан виробу, для відновлення ресурсу якого необхідне часткове розбирання окремих функціональних систем, блоків, їх діагностування та відновлення. Трудомісткість і технологія виконання ремонтних робіт вказує на доцільність середнього ремонту в умовах ремонтного підприємства;

– граничний стан 3 (ГС3) – непрацездатний або працездатний, але граничний стан виробу, який виробив призначені терміни служби. Для відновлення ресурсу необхідна повне розбирання функціональних систем, блоків, їх діагностування та відновлення. Трудомісткість і технологія виконання ремонтних робіт показують на доцільність капітального ремонту в умовах ремонтного підприємства.

Відзначимо, що для станів ГС2 і ГС3 в разі виконання відповідного середнього і капітального ремонту забезпечується продовження експлуатації на термін не менше 5 років.

– граничний стан 4 (ГС4) – виріб виробив призначені терміни служби, кількість середніх і капітальних ремонтів перевищує встановлену, виконання середнього або капітального ремонту економічно не доцільне. Виріб підлягає списанню.

Для визначення таких видів ГС необхідна розробка відповідних контролів технічних (КТС) і граничних станів (КГС). Реалізація таких контролів дозволила б ефективно вирішувати завдання продовження ресурсів РЕС літака в експлуатуючих організаціях, зокрема, завдання планування експлуатації і ремонту літака. Нижче обґрунтовуються ознаки граничних станів РЕС літака, необхідні для вирішення завдань розрахунку показників ЗР. Завдання розробки відповідних контролів граничних станів ГС1 ... ГС4 тут не розглядається.

Важливим завданням при розробці методики КТС і КГС РЕС літака для вирішення завдань продовження ресурсу є формування сукупності ознак, що характеризують зміну технічного стану в процесі експлуатації під впливом різних факторів (рис. 3).

До них відноситься система функціонального використання літака, система ТО і ремонту, кліматичні чинники і механічні дії, часові і конструктивно-технологічні чинники. В свою чергу, вплив системи функціонального використання визначається (див. рис. 3) режимами експлуатації літака, а саме: тривалістю використання за призначенням, тривалістю очікування використання за призначенням, тривалістю зберігання, технологічного обслуговування та іншими операціями використання за призначен-

ням. Експлуатаційна документація літака регламентує режим експлуатації, операції використання за призначенням, кваліфікацію екіпажу і т.д.

Вплив системи ТО і ремонту визначається (рис. 3) передбаченою відповідно до інструкції по експлуатації сукупністю робіт по ТО і ремонту, виконавцями і засобами ТО і ремонту на різних етапах експлуатації літака, механізмом функціонування системи ТО і ремонту.

У зв'язку з різноманітністю чинників, що впливають на стан РЕС літака, неоднорідністю механізмів відмов КВ, ФВ, ФС, блоків і складових частин оцінку технічного і граничного станів РЕС доцільно проводити по векторному показнику. Компоненти такого вектора повинні характеризувати зміни, що відбуваються в складових частинах РЕС літака в процесі експлуатації під впливом наведених факторів (рис. 3), і бути пристосованими до контролювання заданими засобами контролю. При вирішенні завдань продовження ресурсів обов'язковою компонентою цього вектора повинні бути показник безвідмовності або комплексний показник надійності. При формуванні компонента вектора, що характеризує стан РЕС літака, слід враховувати, що ТС об'єкта визначається станом КВ, ФВ, ФС, блоків, і складових частин РЕС літака.

Для оцінки технічного та граничного станів КВ виділяють так звані однорідні групи елементів: ТЕ-Зи, вироби електронної техніки, електрорадіовироби, електромеханічні вузли, субблоки, блоки, що входять до складу різних ФВ і ФС РЕС літака. Зібрана інформація про результати їх випробувань і експлуатації використовується для аналізу надійності виробів.

Важливим з точки зору ефективного використання цих даних є можливість використання інформації про результати випробувань і експлуатації різних пристроїв, що містять загальні КЕ і вузли.

Технічний стан вузлів, субблоків, блоків РЕС літака визначається станом власне КВ (елементів), захисних елементів (корпус, кріплення, плати, вібропоглиначі, вологопоглиначі і ін.), струмопровідних елементів (доріжки плат, дроти, тощо). Тому оцінку ТС вузлів, субблоків, блоків і показників надійності необхідно здійснювати, вважаючи, що в їх склад нарівні з КВ входять струмопровідні і захисні елементи.

Технічний стан РЕС літака залежить, зокрема, від стану кабельної мережі літака, кабелів і проводів. До кабельних виробів відносяться: силові кабелі, кабелі зв'язку, кабелі управління, дроти намотувальні, радіочастотні кабелі та проводи з гумовою, пластмасовою і іншими видами ізоляції. Термін служби кабельних виробів в значній мірі визначається зовнішніми факторами, величина їх терміну служби для РЕС літака становить 5,5-12 років.

Технічний і граничний стан РЕС літака визначається також станом механічних і електромеханічних вузлів і пристроїв (в основному механічних редукторів обертання). Технічний стан цих вузлів і пристроїв багато в чому залежить від регулярності та якості ТО.

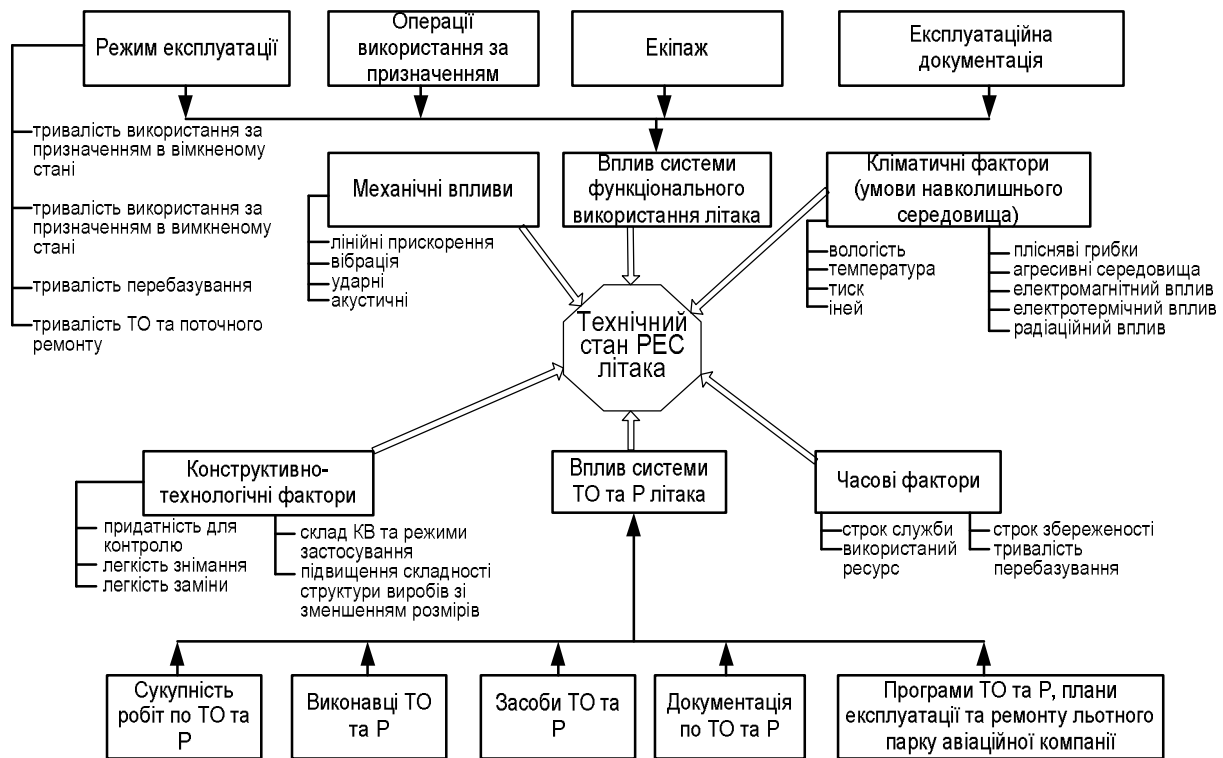


Рис. 3. Фактори, що впливають на технічний стан РЕС літака

Відзначимо, що граничного стану РЕС літака може досягти через низьку довговічність матеріалів. Недостатня стійкість полімерних матеріалів до старіння має, як правило, негативні наслідки в разі їх сусідства з металами. При цьому в більшості випадків активізуються корозійні процеси. Важливим для процесу старіння полімерів є біологічний фактор. Слід зазначити, що на відміну від металів, полімерні матеріали руйнуються під зовнішнім впливом не тільки по поверхні, але і за об'ємом виробу.

Стан перерахованих компонент необхідно відобразити в системі показників технічних і граничних станів РЕС літака.

Серед названих складових компонент вектора ГС обов'язковими складовими повинні бути показники надійності КВ, ФВ, пристроїв, ФС, складових частин і РЕС літака в цілому. Залежно від різновиду аналізованого об'єкта (відновлюваний, невідновлюваний, той що обслуговується і т.д.) доцільно використовувати відповідні показники безвідмовності і комплексні показники надійності.

З вище наведеного випливає, що контроль ТС і ГС РЕС літака доцільно здійснювати за сукупністю показників, що відображають стан КІ, ФВ, блоків, кабельних виробів, матеріалів, їх показників надійності. Крім цього, необхідно цю сукупність показників ТС і ГС доповнити показниками, що характеризують стан допоміжних пристроїв і устаткування: комплектів запасних елементів і запасних частин, експлуатаційної документації.

На множині сформованих показників ТС і ГС РЕС літака необхідно побудувати простір ознак цих станів в певній метриці, наприклад, евклідовій. Далі в просторі виділених ознак необхідно буде вирішувати задачу класифікації фактичного стану РЕС лі-

така за видами ТС і ГС. Для цього попередньо необхідно множину всіх можливих ТС і ГС розбити на підмножини, які відповідають різним видам ТС і ГС.

Для вирішення завдань продовження ресурсу РЕС літака доцільно до встановлених в експлуатаційній документації видів ТЗ (справний, несправний і працездатний) додати граничні стани ГС1, ГС2, ГС3, ГС4. При цьому граничні значення показників ТС і ГС визначаються:

– технічним станом РЕС літака, обсягом робіт з розбирання ФС, ФВ і т.д.;

– технічними можливостями усунення дефектів і відмов в умовах експлуатації з використанням штатних засобів ТО і поточного ремонту, що додаються до літака;

– очікуваною трудомісткістю і вартістю виконання робіт, а також очікуваною тривалістю виведення літака зі стану готовності до експлуатації.

Для класифікації станів S РЕС літака доцільно виділити відповідні підмножини станів $S(\Pi_i)$, для яких виконується умова:

$$\bigcup_{i=0}^4 S(\Pi_i) = S; \quad \prod_{i=0}^4 S(\Pi_i) = \emptyset,$$

де $S(\Pi_i) - GC_i$, причому неграничний стан позначено $S(\Pi_0)$.

Необхідна розробка методики оцінки технічних і граничних станів, що дозволяють за результатами контролів технічного стану на основі векторного показника віднести фактичний стан РЕС літака до одного з видів станів $S(\Pi_i), i = 0, 4$.

Сформована множина показників ТС і ГС, а також виділені ознаки станів дозволяють проводити

розрахунки показників залишкового ресурсу РЕС літака.

При розрахунках і оцінках показників ЗР важливо враховувати всі параметри стану РЕС літака. Граничні стани РЕС літака визначаються сукупністю технічних характеристик, які включають в себе кількісні показники (показники надійності, що характеризуються залежністю параметра потоку відмов $\omega(t)$ від напрацювання, або коефіцієнта готовності $K_z(t)$, показники параметричної надійності) і якісні показники, що характеризують стан матеріалів, конструкцій та ін.

Визначення напрацювання до ресурсної відмови є завданням прогнозування ресурсу РЕС літака. Прогнозування ресурсу за кількісними показниками можна проводити розрахунково-експериментальним методом, зокрема, по параметру потоку відмов, коефіцієнту готовності та показниками параметричної надійності.

Прогнозування ТС за показниками параметричної надійності має ґрунтуватися на даних вимірів ВП ФС і ФВ РЕС літака і їх регулюванні в процесі періодичних ТО. Для вирішення завдання продовження ресурсів доцільно мати моделі зміни ВП, що подаються у вигляді випадкових процесів і засновані на періодичних вимірах їх реалізацій. Такі статистичні моделі дозволяють знаходити точкові і інтервальні оцінки параметричної надійності РЕС літака за результатами періодичних вимірювань ВП.

3. Загальні положення по розрахунку параметра потоку відмов комплектуючих виробів і функціональних вузлів РЕС літака Відповідно до викладеної вище блок-схеми розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака необхідно розраховувати параметри потоку відмов КВ, ФВ РЕС літака.

Відомі аналітичні методи розрахунку параметра потоку відмов РЕС літака і складних технічних систем засновані на побудові математичних моделей потоків відмов груп однорідних елементів з подальшим розрахунком параметра потоку відмов РЕС літака у вигляді суми:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^M n_i \omega_i(t), \quad (4)$$

де M – кількість типів груп однорідних елементів в РЕС літака; n_i – кількість елементів i -го типу в РЕС літака; $\omega_i(t)$ – параметр потоку відмов елемента i -го типу.

Розрахунок параметра потоку відмов $\omega_i(t)$ відбувається, як відомо, з використанням рівняння Вольєрра

$$\omega_i(t) = f_i(t) + \int_0^t f_i(t-u) \omega(u) du, \quad (5)$$

де $f_i(t)$ – щільність розподілу напрацювання до відмови елементів i -го типу на певній схемній позиції в РЕС літака.

При розрахунках прийняті такі допущення:

- число відновлень елемента на певній схемній позиції за доремонтний або міжремонтний термін служби РЕС літака є нескінченно велика величина;
- відновлення ресурсу елемента повне, тобто розглядається модель повних відновлень;
- сумарні напрацювання різних ФС РЕС літака до моменту проведення планових робіт (щодо продовження ресурсів, ремонту і т.п.) є однаковими і детермінованими;
- параметр потоку відмов РЕС літака розраховується шляхом підсумовування параметрів потоку відмов різнорідних груп КВ, які можуть істотно відрізнятися за рівнем безвідмовності.

Перераховані допущення, як правило, спрощують розрахунки, знижують їх трудомісткість, проте в більшості випадків істотно знижують їх точність.

Процес відмов і відновлень КВ певних схемних позицій РЕС літака представляють потоком відмов і відновлень, вивченню яких присвячена теорія відновлень. Найбільшого поширення в практиці розрахунків отримали два типи відновлень: "простий", при якому всі функції розподілу напрацювань до першого $F_i(t)$ і між наступними відмовами однакові; і "загальний", при якому всі функції розподілу однакові, крім першої, тобто $F_{i,i+1}(t) \neq F_1$, $i = 1, 2, \dots$.

Реальні процеси відновлень РЕС літака характеризуються істотно більшою розмаїтістю потоків відмов і відновлень, пов'язаних з проведеними в процесі експлуатації РЕС різними видами відновлень КВ (повними, мінімальними і неповними), кінцевим числом відновлень і т.д. Так, в РЕС літака для відновлення ФС використовуються ТЕЗи, інші КВ, які в процесі їх зберігання в комплектах ЗІП до моменту установки можуть втратити частину свого ресурсу. Крім того, ТЕЗи можуть бути відновлюваними елементами, що характерно для КВ 3-го покоління (та вище), які, природно, до моменту їх установки в апаратуру після чергового відновлення мають певну величину витраченого ресурсу. Згідно з нормативно-технічною документацією допускається поставляти КВ, вироби електронної техніки, електротехніки, які пройшли випробування на безвідмовність, якщо тривалість випробувань не перевищує 20% їх гарантійного напрацювання.

У зв'язку з цим великий інтерес представляє (крім відомих в теорії відновлень простих і загальних процесів повних відновлень) розгляд процесу відновлень з різними функціями розподілу напрацювань між відмовами, який назовемо складним процесом відновлень. Складний процес відновлень характерний для неповних і мінімальних відновлень, коли параметри ресурсів КВ до першого разу (заміни) і наступними відмовами розрізняються. Ці параметри для складного процесу відновлень можуть бути отримані на основі обробки ретроспективної інформації, наприклад, шляхом отримання за результатами статистичної обробки даних лідерної експлуатації РЕС літака кореляційних залежностей. Так, зменшення середніх напрацювань КВ після заміни можна обґрунтувати за допомогою моде-

лей ресурсів КВ, і розгляду середніх напрацювань КВ до першої відмови, між 1-м і 2-м відмовами, 2-м і 3-м і т.д.

Розрахунок доцільно проводити для лінійної залежності, а коефіцієнти кореляційних залежностей визначати методом найменших квадратів.

Інший спосіб обліку змін в безвідмовності ФС РЕС літака заснований на обліку віку відновлюваного КВ на певній схемній позиції ФС або РЕС літака.

Аналіз робіт з визначення показників довговічності РЕС літака, зокрема призначених термінів служби до ремонту, заснований на застосуванні співвідношення (4). Точність наближення сумарного потоку відмов моделлю нестационарного пуассоновського потоку залежить від числа елементів, відмінності законів розподілу часу безвідмовної роботи окремих елементів від експоненціального і очікуваного числа відмов. Щоб відміна індивідуальних законів розподілу мало впливала на форму потоку раптових відмов, необхідне виконання співвідношення:

$$n_i/M[n] > 10(\lambda_0/\lambda - 1), \text{ при } M[n] > 1, \quad (6)$$

де $M[n]$ – математичне сподівання числа відмов на розглянутому інтервалі часу; λ_0 – значення інтенсивності відмов в початковий момент часу (на початку періоду напрацювання); λ – сталі значення інтенсивності відмов.

Сенс наведеної нерівності полягає в наступному. При малих значеннях відношення $n_i/M[n]$ кожен елемент може відмовити кілька разів і закон розподілу числа відмов сумарного потоку буде в значній мірі визначатися індивідуальними законами розподілу напрацювань між відмовами елементів. При великих значеннях відносини $n_i/M[n]$ кількість відмов кожного елемента в загальному потоці невелика і тому індивідуальні закони розподілу елементів не впливають на закон розподілу числа відмов в сумарному потоці.

Все сказане відноситься більшою мірою і до поступових відмов. Відмінності полягають в тому, що потік поступових відмов елементів ФВ або навіть ФС можна розглядати як суму потоків відмов великого числа елементів.

Крім цього, співвідношення (4) має місце для відновлюваних виробів з послідовною структурною схемою надійності (ССН) за умови, що його КЕ функціонують незалежно і, в разі відмови окремого КЕ, інші продовжують функціонувати, при цьому потік відмов КЕ є ординарним потоком без післядії або з обмеженим післядією, сумарні напрацювання

КЕ виробу однакові (або тривалість відновлення дорівнює нулю). У розроблених методиках розрахунку показників залишкового ресурсу пропонується використовувати розрахункове співвідношення (4) тільки для знаходження параметра потоку відмов КВ, які відповідають вищезгаданим умовам і є елементами послідовної ССН.

При цьому результати оцінки параметра потоку відмов використовуються для розрахунку нестационарного коефіцієнта готовності або коефіцієнта оперативної готовності КВ, ФВ, блоків, до складу яких входять дані КВ.

Нижче розглядаються математичні моделі потоку відмов КВ РЕС літака, орієнтовані на їх використання при розрахунках показників залишкового ресурсу і вільні від сформульованих вище припущень. Наводиться узагальнення відомих моделей потоків відмов з урахуванням специфіки функціонування РЕС літака. При цьому багато відомих моделей можна розглядати як окремі випадки узагальнених.

Висновки

1. Розроблені загальні положення по розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака, що включають ієрархічну схему розрахунку типу дерево: "РЕС літака – ФС – ФВ (блок) – КВ", процедуру розбиття ФС, ФВ і КВ на невідновлювані та відновлювані об'єкти з повними, мінімальними або неповними відновленнями, контрольовані періодично і безперервно, або неконтрольовані і т.д.; процедуру розробки нових або використання відомих математичних моделей процесів відмов і відновлень для відповідних об'єктів, інші загальні положення.

2. Сформульовано загальні положення щодо оцінки технічного стану та обґрунтування ознак граничних станів РЕС літака для вирішення завдань продовження ресурсів. Показано, що оцінку граничних станів РЕС літака доцільно здійснювати за сукупністю показників, що відображають стан КВ ФВ, ФС, складових частин літака, кабельних виробів, матеріалів, допоміжних пристроїв, устаткування та їх показників надійності.

Цю сукупність показників необхідно враховувати при розрахунках і оцінках показників залишкового ресурсу. Виділена сукупність технічних характеристик і ознак граничних станів, що дозволяють вирішувати завдання розрахунку показників залишкового ресурсу.

3. Сформульовано загальні положення по розрахунку параметра потоку відмов КВ і ФВ РЕС літака, з розробки математичних моделей процесів їх відмов і відновлень для вирішення завдань продовження ресурсів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними : ДСТУ 3004-95. – [Чинний від 1995-01-25]. – К.: Держспроживстандарт України, 1995. – 51 с.
2. Бобало Ю.Я. Якість, надійність радіоелектронної апаратури: [монографія] / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник; за ред. Л.А. Недоступа. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – 196 с.
3. Бобало Ю.Я. Аналіз методів оцінювання безвідмовності систем сумісно працюючих компонентів електронних пристроїв / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, О.В. Лазько // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 7 (26). – С. 212–214.

4. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытание на безотказность: пер. с англ. И.А.Ушакова, М.: Наука, 1985г.
5. Юрков Н.К. К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н.К. Юрков, И.И. Кочегаров, Д.Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 220-231.
6. Кучук Г.А. Розрахунок навантаження мультисервісної мережі / Г.А. Кучук, Я.Ю. Стасєва, О.О. Болубаш // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 4 (8). – С. 130 – 134.
7. Коваленко А. А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2014. – № 1(38). – С. 116-119.
8. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
9. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка / ГА Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.
10. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
11. 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., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8
12. Гудков М. В. Методика прогнозування надійності радіоелектронного обладнання при експлуатації авіаційної техніки за станом з контролем параметрів / М.В. Гудков // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – № 4(24). – С. 32-35.
13. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
14. Сучасні методи прогнозування технічного стану авіаційної техніки / О. М. Добриденко, А. С. Бологін, М. Ф. Хільченко, Р.Б. Белінська // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. - 2011. - Вип. 7(14). - С. 163-167.
15. Кучук Г.А. Минимизация загрузки каналов связи вычислительной сети / Г.А. Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1998. – Вип. 1(5). – С. 149-154.
16. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", Advanced Information Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
17. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
18. Коваленко А.А. Использование временных шкал при аппроксимации длины очередей компьютерных сетей / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук, И.В. Рубан // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2018. – № 2 (4). – С. 12–18. – DOI: <http://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.012>
19. Кучук Г. А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
20. Чернявський В. М. Застосування непараметричних методів для оцінки рівня надійності авіаційної техніки з низькою інтенсивністю експлуатації / В.М. Чернявський // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2012. – № 3(32). – С. 59-63.
21. Кучук, Г.А. Синтез стратифікованої інформаційної структури інтеграційної компоненти гетерогенної складової Єдиної АСУ Збройними Силами України / Г.А. Кучук, О.П. Давікоза // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: ХУ ПС, 2013. – № 3(12). – С. 154-158.
22. Каштанов В.А. Теория надежности сложных систем /В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – 2-е изд, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.
23. Козлов В.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское радио, 1985. – 462 с.

Received (Надійшла) 20.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2020

Development of general provisions for calculating residual resource indicators radio electronic aircraft system

S. Haievskyi, S. Balakireva, I. Kulakov

Abstract. The **subject matter** of the article are the functioning processes of the electronic system of a modern aircraft, its components and functional units as an object for determining and calculating the residual resource. The **goal** is the analysis of the existing methodological apparatus used to calculate the indicators of the residual life of the aircraft electronic system and search for ways to improve it. The **tasks**: to develop general provisions for calculating the indicators of the residual life of the aircraft electronic system. Analyzed **methods** are: calculation and experimental methods for assessing reliability, residual life and failure flow of an aircraft electronic system. The following **results** were obtained: A tree-type hierarchical calculation scheme has been developed: "aircraft electronic system – functional system – functional unit (block) - component product" and the procedure for splitting the circuit positions into non-renewable and renewable objects. **Conclusions.** The general provisions are formulated for calculating the parameters of the flow of failures and assessing the technical condition of the radio-electronic system of the aircraft to solve the problems of extending resources.

Keywords: residual life, aircraft, indicator, service life extensions, electronic system, technical condition.