АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.7.05
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/01

Рагулін С. В.
Херсонський державний аграрно-економічний університет

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІСЛЯГАРАНТІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВОВАНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Період післягарантійної експлуатації характеризується особливими фінансовими та організаційними взаємовідносинами між постачальником і експлуатантом. Тому у даній роботі запропоновано метод, що враховує основні техніко-економічні показники післягарантійного процесу технічного обслуговування і ремонту. Метод описується регенеруючим випадковим процесом з кінцевим числом станів. На підставі нього визначено середній час знаходження радіоелектронних навігаційних систем в різних станах експлуатації, що дозволяє отримати основні показники ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем. У період післягарантійної експлуатації експлуатант, як правило, має значний обсяг статистичної інформації про надійність радіоелектронних навігаційних систем. Тому в цей період є можливість оцінити інтенсивності виникнення як прихованих, так і явних відмов.

Ефективність експлуатації повітряних суден безпосередньо визначається оптимальним варіантом організації системи технічного обслуговування і ремонту, вибір якого ґрунтується на вирішенні комплексу завдань діагностичного забезпечення, методичного, нормативного забезпечення та оптимального формування обмінного фонду.

Для оцінки експлуатаційної надійності радіоелектронних навігаційних систем визначена необхідність оцінювати вірогідність відмови системи протягом польоту. Для цього в статті визначено експлуатаційну ймовірність безвідмовної роботи на нескінченному інтервалі планування технічного обслуговування з урахуванням показників достовірності контролю, періодичності контролю та інтенсивності явних і прихованих відмов.

Для оцінки ефективності різних варіантів організації технічного забезпечення експлуатації радіоелектронних навігаційних систем в післягарантійний період в роботі розроблені відповідні функції вартості, що враховують той факт, що після закінчення дії гарантійних зобов'язань постачальника експлуатант сам оплачує всі витрати, пов'язані з відновленням систем.

Для оцінки імовірнісних показників ефективності експлуатації резервованих систем та оцінці критичних відмов розроблено метод, що дозволяє враховувати множинні відмови резервованих радіоелектронних навігаційних систем.

Ключові слова: *системи контролю, ефективність, технічне обслуговування, легко замінні блоки, радіоелектронні навігаційні системи.*

Постановка проблеми. Найбільш значний влив на діяльність експлуатантів здійснює етап післягарантійного обслуговування оскільки основний фінансовий тягар по організації системи технічного обслуговування і ремонту лягає на плечі експлуатанта.

Таким чином, розробка методів підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден в період післягарантійного обслуговування являє собою важливе народногосподарське наукове завдання спрямоване на удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту, зниження експлуатаційних витрат і підтримки необхідного рівня безпеки та регулярності польотів повітряних суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі приклади вирішення окремих завдань підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту в роботах колективу дослідників С. В. Далецького, В. О. Ігнатова, О. П. Ковтуненка, Г. Ф. Конаховича, О. А. Тамаргазіна, В. В. Уланського.

Значний внесок у вирішення завдань підвищення технічної експлуатації на різних етапах

експлуатації вніс І. О. Мачалін, який представив методологічні основи технічного обслуговування і ремонту повітряних суден. Проте питання, підвищення ефективності післягарантійного обслуговування висвітлені не повністю.

Постановка завдання. Розглянемо випадок, коли радіоелектронна навігаційна система (РЕНС) є одноблоковою, тобто включає в себе один легко замінний блок (ЛБ). Нехай в момент $t = 0$ починає функціонувати ЛБ, напрацювання якого до прихованої відмови Ξ розподілена за законом $F(\xi)$. Прихована відмова ЛБ можна виявитися тільки за результатами контролю працездатності (КП). У ЛБ може також виникнути явна відмова. Функція розподілу напрацювання до явної відмови R відома і дорівнює $\Phi(\rho)$. При появі явної відмови ЛБ відключається. Передбачається, що явні і приховані відмови є статистично незалежними.

Встановлюється наступний порядок технічного обслуговування (ТО). Якщо при використанні за призначенням у ЛБ сталася явна відмова, то в випадковий момент його виникнення починається відновлення працездатності ЛБ. При цьому час між моментом виникнення явної відмови і моментом посадки повітряного судна (ПС) виключається з розгляду, оскільки ЛБ відключений. Якщо при черговому КП виявляється прихована відмова, то проводиться відновлення працездатності правильно забракованого ЛБ. Нарешті, якщо при КП прийнято помилкове рішення про визнання непрацездатності ЛБ, який насправді є працездатним («помилкова відмова»), то проводиться «помилкове» відновлення працездатності ЛБ [1, 2].

Оскільки відновлення забракованого при КР ЛБ проводиться після посадки ПС в базовому аеропорту, то в межах розглянутої моделі таке відновлення будемо називати плановим. Відновлення після явної відмови назвемо позаплановим. Вважається, що будь-який з видів відновлення повністю оновлює ЛБ, і моменти закінчення відновлювальних робіт є моментами регенерації.

Розглянемо найбільш загальний випадок, при якому КП планується проводити в моменти $0 < t_1 < t_2 < \ldots < T_N < T$, якщо $T < \infty$ і в моменти $0 < t_1 < t_2 < \ldots$, якщо $T = \infty$.

Оскільки після відновлення ЛБ вважається оновленим, то проводиться перепланування моментів КП. Позначимо через ρ_j момент виникнення явної відмови у j-го *ЛБ*.Нехай: $T < \infty$. Тоді, якщо $\rho_j + t_1 \geq T$, то в момент T необхідно провести відновлення ЛБ. Якщо $\rho_j + t_k < T$ ($k = 1, 2, \ldots$; $k \leq N$), то при КП в момент $\rho_j + t_{k+1}$ приймаються наступні рішення:

– допустити ЛБ до використання до проведення чергового КП в момент $\rho_j + t_{k+1}$, якщо він визнаний працездатним, і $\rho_j + t_{k+1} < T$; в іншому випадку (якщо $\rho_j + t_{k+1} \geq T$) – в момент T провести відновлення *ЛБ*;

– відновити ЛБ, якщо він визнаний непрацездатним, і допустити його до використання. Черговий КП проводити в момент $\rho_j + t_{k+1} + t_1$, якщо $\rho_j + t_{k+1} + t_1 < T$, інакше (якщо $\rho_j + t_{k+1} + t_1 \geq T$) – в момент T провести відновлення *ЛБ*.

Якщо $T = \infty$, то при призначенні чергового моменту КП в описаній вище процедурі необхідно покласти $T = \infty$.

Розглянемо випадковий процес $L(t)$, що характеризує стан ЛБ в довільний момент часу t. З опису стратегії ТО випливає, що в довільний момент часу t ЛБ може перебувати в одному з наступних станів: E_1, якщо в момент t ЛБ використовувався за призначенням і знаходився в працездатному стані; E_2, якщо в момент t ЛБ використовувався за призначенням і знаходився в непрацездатному стані (прихована відмова); E_3, якщо в момент t ЛБ не використовувався за призначенням і проводився КП; E_4, якщо в момент t ЛБ не використовувався за призначенням і проводився його демонтаж або монтаж на борту ПС; E_5, якщо в момент t забракований ЛБ позапланово простоював на борту ПС в базовому аеропорту через незадоволення заявки на запасний ЛБ з обмінного фонду; E_6, якщо в момент t проводилося відновлення «помилково» забракованого ЛБ; якщо в момент t проводилося позапланове відновлення ЛБ, що відмовив; E_7, якщо в момент t проводилося відновлення «правильно забракованого» ЛБ.

Виклад основного матеріалу. Введемо в розгляд наступні показники достовірності багаторазового КП на нескінченному інтервалі планування ТО:

$$P_{ХВ}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \middle| \xi\right) = P\left\{\bigcap_{i=1}^{v-1} \Xi_i^* > t_i \bigcap \Xi_v^* \leq t_v \middle| \Xi = \xi\right\} -$$

умовна ймовірність «помилкового відмови», що визначається як ймовірність спільного настання таких подій: при КП в моменти t_1, t_{v-1} $(v = \overline{1,k})$ *ЛБ* визнавався працездатним, а при КР в момент t_v був помилково забракований за умови, що $\Xi = \xi u$ $t_k < \xi < t_{k+1}$, де Ξ_i^* – випадкова оцінка напрацювання ЛБ до відмови при КП в момент t_i;

$$P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \middle| \xi\right) = P\left\{\bigcap_{v=1}^{k} \Xi_v^* > t_v \middle| \Xi = \xi\right\} -$$ умовна ймовірність події «ЛБ правильно визнаний працездатним» за умови, що $\Xi = \xi$ і $t_k < \xi < t_{k+1}$;

$P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\xi)=P\left\{\bigcap_{i=1}^{j-1}\Xi_i^*>t_i\bigcap\Xi_i^*\le t_j\middle|\Xi=\xi\right\}$ – умовна ймовірність події «ЛБ правильно визнаний непрацездатним» за умови, що $\Xi=\xi$ і $t_k<\xi<t_{k+1}$;

визначається як ймовірність настання таких подій: при КП в моменти $\overline{t_1,t_k}$ *ЛБ* правильно визнавався працездатним; при КП в моменти $\overline{t_{k+1},t_{j-1}}$ *ЛБ* помилково визнавався працездатним, а при КП в момент $t_j(j=\overline{k+1,N})$ *ЛБ* був правильно визнаний непрацездатним за умови, що (t_j, t_{j+1}) и $\Xi=\xi$;

$P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N|\xi)=P\left\{\bigcap_{i=1}^{N}\Xi_i^*>t_i\middle|\Xi=\xi\right\}$ – умовна ймовірність події «невиявленої відмови», що представляє собою ймовірність того, що при КП в моменти $\overline{t_1,t_k}$ *ЛБ* правильно визнавався працездатним, а при КП в моменти $\overline{t_{k+1},t_N}$ помилково визнавався працездатним, що $\Xi=\xi$ і $t_k<\xi<t_{k+1}$;

Загальні вирази для розрахунку умовних ймовірностей $P_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\xi)$, $P_{ППП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k|\xi)$, $P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\xi)$, $P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N|\xi)$ наведені в роботах [2,3].

Наступна теорема дозволяє визначити середні тривалості $\overline{MS_1,MS_8}$.

Теорема 1. Якщо $T<\infty$, то мають місце такі формули:

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_1

$$\begin{aligned}MS_1=&\sum_{k=0}^{N}\int_{t_j}^{t_{j+1}}\left\{\sum_{v=1}^{j}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+uP_{ППП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\vartheta)\right\}d\Phi(u)+\\&+\int_{t_k}^{\vartheta}\left\{\sum_{v=1}^{k}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+uP_{ППП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k|\vartheta)\right\}d\Phi(u)+\\&+\left\{\sum_{v=1}^{k}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+\vartheta P_{ППП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k|\vartheta)\right\}\left[1-\Phi(\vartheta)\right]\Bigg\}dF(\vartheta)+\\&+\int_{T}^{\infty}\left\{\sum_{j=0}^{N}\int_{t_j}^{t_{j+1}}\left\{\sum_{v=1}^{j}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+uP_{ППП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\vartheta)\right\}d\Phi(u)+\right.\\&\left.+\left\{\sum_{v=1}^{N}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+T\times P_{ППП}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N|\vartheta)\right\}\left[1-\Phi(T)\right]\right\}dF(\vartheta);\end{aligned}\tag{1}$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_2

$$\begin{aligned}MS_2=&\sum_{k=0}^{N-1}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\int_{\vartheta}^{t_{k+1}}(u-\vartheta)P_{ППП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k|\vartheta)d\Phi(u)+\right.\\&+\sum_{n=k+1}^{N}\int_{t_n}^{t_{n+1}}\left[\sum_{j=k+1}^{n}(t_j-\vartheta)P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\vartheta)+(u-\vartheta)P_{НВ}(\overline{t_1,t_{n-1}};t_n|\vartheta)\right]d\Phi(u)+\\&+\left[\sum_{j=k+1}^{N}(t_j-\vartheta)P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\vartheta)+(T-\vartheta)P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N|\vartheta)\right]\left[1-\Phi(T)\right]dF(\vartheta)+\\&\left.+\int_{t_N}^{T}\left\{\int_{\vartheta}^{T}(u-\vartheta)P_{ППП}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N|\vartheta)d\Phi(u)+(T-\vartheta)P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N|\vartheta)\left[1-\Phi(T)\right]\right\}dF(\vartheta);\right.\end{aligned}\tag{2}$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_3

$$\begin{aligned}MS_3=&t_{KP}\sum_{k=0}^{N-1}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\left[\sum_{j=0}^{k-1}\left[\sum_{v=1}^{j-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+jP_{ППП}(\overline{t_1,t_{j-2}};t_{j-1}|\vartheta)\right]\times\left[\Phi(t_{j+1})-\Phi(t_j)\right]\right\}+\right.\\&+\sum_{j=k-1}^{k}\left[\sum_{v=1}^{j-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+(j+1)P_{ППП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\vartheta)\right]\left[\Phi(t_{j+2})-\Phi(t_{j+1})\right]+\\&+\sum_{j=k+2}^{N-1}\left[\sum_{v=1}^{k}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+\sum_{j=k+1}^{i-1}jP_{ППП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\vartheta)+iP_{НВ}(\overline{t_1,t_{i-2}};t_i|\vartheta)\right]+\left[\Phi(t_{i+1})-\Phi(t_i)\right]+\\&\left.+\left[\sum_{v=1}^{k}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+\sum_{j=k+1}^{N-1}jP_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j|\vartheta)+NP_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-2}};t_{N-1}|\vartheta)\right]\left[1-\Phi(t_N)\right]\right\}dF(\vartheta)+\\&+t_{KP}\int_{t_N}^{\infty}\left\{\left[\sum_{j=0}^{N-1}\left[\sum_{v=1}^{j-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+jP_{ППП}(\overline{t_1,t_{j-2}};t_{j-1}|\vartheta)\right]\times\left[\Phi(t_{j+1})-\Phi(t_j)\right]\right\}+\right.\\&\left.+\left[\sum_{v=1}^{N-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v|\vartheta)+NP_{ППП}(\overline{t_1,t_{N-2}};t_{N-1}|\vartheta)\right]\left[1-\Phi(t_N)\right]\right\}dF(\vartheta);\end{aligned}\tag{3}$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_4

$$MS_4 = t_M + t_D; \quad (4)$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_5

$$MS_5 = \psi(\Delta t_{SP} + t_M + t_D - t_C); \quad (5)$$

$$\psi = \begin{cases} 0, \text{ if } t_C \geq (\Delta t_{SP} + t_D + t_M); \\ 1, \text{ if } t_C < (\Delta t_{SP} + t_D + t_M), \end{cases}$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_6

$$MS_6 = t_{ЛВ} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left\{ \begin{array}{l} \left[\sum_{j=1}^{k-1} \left[\sum_{v=1}^{j-1} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \vartheta) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] \right] \end{array} \right\} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{k} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \vartheta) \left[1 - \Phi(t_k) \right] dF(\vartheta) + \quad (6)$$

$$+ t_{ЛВ} \int_{t_N}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \left[\sum_{j=1}^{N-1} \left[\sum_{v=1}^{j} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \vartheta) \right] + \right. \\ + \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] \\ \left. + \sum_{k=1}^{N} P_{XB}(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \,|\, \vartheta) \left[1 - \Phi(t_N) \right] \right] \end{array} \right\} dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_7

$$MS_7 = t_{BB} \sum_{k=0}^{N} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left\{ \begin{array}{l} \left[\sum_{j=0}^{k} P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \,|\, \vartheta) \times \right. \\ \times \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] + \\ \left. + \sum_{i=k+1}^{N} P_{HB}(\overline{t_1, t_{i-1}}; t_i \,|\, \vartheta) \times \right. \\ \left. \times \left[\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i) \right] \right] \end{array} \right\} dF(\vartheta) + \quad (7)$$

$$+ t_{BB} \int_{t_N}^{\infty} \left\{ \sum_{j=0}^{N} P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \,|\, \vartheta) \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] \right\} dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_8

$$MS_8 =$$

$$= t_{ПВ} \sum_{k=0}^{N} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left\{ \begin{array}{l} \left[\sum_{i=k+1}^{N} \left[\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i) \right] + \right. \\ + \left[\sum_{i=k+1}^{j} P_{ПН}(\overline{t_1, t_{i-1}}; t_i \,|\, \vartheta) + \right. \\ \left. + P_{ПР}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \,|\, \vartheta) \left[1 - \Phi(T) \right] \right] \end{array} \right\} dF(\vartheta), \quad (8)$$

де Δt_{SP} – середній час затримки в задоволенні заявки на запасний *ЛБ*; ψ –індикаторна функція; t_{BB} – середня тривалість позапланового відновлення *ЛБ*.

Доведення. Для стислості викладу доведемо тільки співвідношення (1). Співвідношення (4) і (5) очевидні і не вимагають доказів. Решта співвідношення доводяться аналогічно (1). Нехай прихована відмова з'являється в ЛБ раніше, ніж явна, тобто $\xi \leq \rho$ і $t_k < \xi \leq t_{k+1} (k = \overline{0, N})$. Тоді умовне математичне очікування (МО) часу знаходження ЛБ в стані E_1 за умови, що $\Xi = \xi$, $R = \rho$ і $\xi \leq \rho$ визначається за формулою:

$$M\left[S_1 \,|\, \xi \leq \rho \right] = \begin{cases} \xi, \text{якщо } 0 \leq \xi < t_1; \\ \sum_{v=1}^{k} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \xi \right) + \\ + \xi P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \,|\, \xi \right), \\ \text{якщо } t_k \leq \xi < t_{k+1} \left(k = \overline{1, N} \right); \\ \sum_{v=1}^{k} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \xi \right) + \\ + \xi P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{N-1}}; t_N \,|\, \xi \right), \\ \text{якщо } \xi \geq T. \end{cases} \quad (9)$$

Приймемо, що $\xi > \rho$ і $t_k < \rho \leq t_{k+1}$. У цьому випадку ЛБ напрацює до моменту $t_v (v = \overline{0, k})$, якщо при v-му КП з умовною ймовірністю $P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \xi)$ виникне «хибна відмова». У подальшому ЛБ пропрацює час ρ, якщо при КП в момент t_k з умовною ймовірністю $P_{ПП}(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \,|\, \xi)$ виникне подія «ЛБ правильно працездатний».

Таким чином, умовне математичне очікування часу знаходження ЛБ у стані E_1 при умові, що $\Xi = \xi$, $R = \rho i \xi > \rho$:

$$M\left[S_1 \,|\, \xi > \rho \right] = \begin{cases} \rho, \text{якщо } 0 \leq \xi < t_1; \\ \sum_{v=1}^{j} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \xi \right) + \\ + \rho P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \,|\, \xi \right), \\ \text{якщо } t_j \leq \rho < t_{j+1} \left(j = \overline{1, N} \right); \\ \sum_{v=1}^{N} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \,|\, \xi \right) + \\ + \xi P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{N-1}}; t_N \,|\, \xi \right), \text{якщо } \rho \geq T. \end{cases} \quad (10)$$

Умовне математичне очікування часу знаходження ЛБ у стані E_1 при умові, що $\Xi = \xi$, $R = \rho$ визначається як:

$$M\left[S_1 \,|\, \xi, \rho \right] = \min\left\{ M\left[S_1 \,|\, \xi \leq \rho \right], M\left[S_1 \,|\, \xi > \rho \right] \right\}. \quad (11)$$

З виразу (11) видно, що час перебування ЛБ в стані E_1 є функцією двох випадкових величин Ξ і R. Тому МО часу перебування ЛБ в стані E_1:

$$MS_1 = \sum_{k=0}^{\infty}\sum_{j=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\int_{t_j}^{t_{j+1}} M\left[S_1\middle|\vartheta,u\right]d\Phi(u)dF(\vartheta). \quad (12)$$

З урахуванням виразу (11) формулу (12) перетворимо до вигляду:

$$MS_1 = \sum_{k=0}^{N}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\int\limits_{t_j}^{t_{j+1}} M\left[S_1\middle|\vartheta>u\right]d\Phi(u)+\\ \sum\limits_{j=0}^{k-1}+\int\limits_{t_k}^{\vartheta} M\left[S_1\middle|\vartheta>u\right]d\Phi(u)+\\ +\int\limits_{\vartheta}^{\infty} M\left[S_1\middle|\vartheta\le u\right]d\Phi(u)\end{array}\right\}dF(\vartheta)+ \quad (13)$$

$$+\int_{T}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}\int\limits_{t_j}^{t_{j+1}} M\left[S_1\middle|\vartheta>u\right]d\Phi(u)+\\ \sum\limits_{j=0}^{N}\\ +\int\limits_{T}^{\infty} M\left[S_1\middle|\vartheta\le u\right]d\Phi(u)\end{array}\right\}dF(\vartheta).$$

Підставивши в формулу (13) вирази (9) і (10) після відповідних перетворень, отримаємо співвідношення (1). Теорема доведена.

Наслідок 1. Якщо $T = \infty$, то мають місце наступні залежності:

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_1

$$MS_1 = \sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\sum_{j=0}^{k-1}\int_{t_j}^{t_{j+1}}\left[\begin{array}{l}t_v P_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)+\\ +uP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\vartheta)\end{array}\right]\right\}d\Phi(u)+$$

$$+\int_{t_k}^{\vartheta}\left\{\sum_{v=1}^{k} t_v P_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)+ uP_{ПП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k\,|\vartheta)\right\}d\Phi(u)+ \quad (14)$$

$$+\left\{\sum_{v=1}^{k} t_v P_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)+ \vartheta P_{ПП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k\,|\vartheta)\right\}\left[1-\Phi(\vartheta)\right]\Bigg\}dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_2

$$MS_2 = \sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\int_{\vartheta}^{t_{k+1}}(u-\vartheta)P_{ПП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k\,|\vartheta)d\Phi(u)+\right.$$

$$\left.+\sum_{n=k+1}^{\infty}\int_{t_n}^{t_{n+1}}\left[\sum_{j=k+1}^{n}(t_j-\vartheta)P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\vartheta)+ (u-\vartheta)P_{НВ}(\overline{t_1,t_{n-1}};t_n\,|\vartheta)\right]d\Phi(u)\right\}dF(\vartheta); \quad (15)$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_3

$$MS_3 = t_{KP}\sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\left[\sum\limits_{j=0}^{k-1}\left[\begin{array}{l}\sum\limits_{v=1}^{j-1} vP_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)+\\ +jP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-2}};t_{j-1}\,|\vartheta)\end{array}\right]\times\right.\\ \left.\times\left[\Phi(t_{j+1})-\Phi(t_j)\right]\end{array}\right\}+$$

$$+\sum_{j=k-1}^{k}\left[\begin{array}{l}\sum\limits_{v=1}^{j} vP_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)+\\ +(j+1)P_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\vartheta)\end{array}\right]\left[\Phi(t_{j+2})-\Phi(t_{j+1})\right]+ \quad (16)$$

$$+\sum_{j=k+2}^{\infty}\left[\begin{array}{l}\sum\limits_{v=1}^{k} vP_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)+\\ +\sum\limits_{j=k+1}^{i-1} jP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\vartheta)+iP_{НВ}(\overline{t_1,t_{i-2}};t_i\,|\vartheta)\end{array}\right]+$$

$$+\left[\Phi(t_{i+1})-\Phi(t_i)\right]\Bigg\}dF(\vartheta)(\ );$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_6

$$MS_6 = t_{ЛВ}\sum_{k=1}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\left[\sum\limits_{j=1}^{k-1}\left[\sum\limits_{v=1}^{j} P_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)\right]\times\right.\\ \left.\times\left[\Phi(t_{j+1})-\Phi(t_j)\right]\end{array}\right\}+ \quad (17)$$

$$+\sum_{j=1}^{k} P_{XB}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\vartheta)\left[1-\Phi(t_k)\right]\Bigg\}dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_7

$$MS_7 = t_{BB}\sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{j=0}^{k} P_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\vartheta)\times\\ \times\left[\Phi(t_{j+1})-\Phi(t_j)\right]+\\ +\sum\limits_{i=k+1}^{\infty} P_{НВ}(\overline{t_1,t_{i-1}};t_i\,|\vartheta)\times\\ \times\left[\Phi(t_{i+1})-\Phi(t_i)\right]\end{array}\right\}dF(\vartheta); \quad (18)$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_8

$$MS_8 = t_{ПВ}\sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{i=k+1}^{\infty}\left[\Phi(t_{i+1})-\Phi(t_i)\right]+\\ +\sum\limits_{i=k+1}^{j} P_{ПН}(\overline{t_1,t_{i-1}};t_i\,|\vartheta)\end{array}\right\}dF(\vartheta). \quad (19)$$

Для доведення співвідношень (14)–(19) достатньо в виразах (1)–(3) та (6)–(8) підставити значення $T = \infty$ та $N = \infty$.

Синтез методу оцінок середнього часу знаходження легко знімних блоків в різних станах післягарантійної експлуатації при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови.

У період післягарантійного ТО експлуатація РЕНС повинна розглядатися на інтервалі (0, T), де T – призначений ресурс. Оскільки значення T для сучасних РЕНС значно більший середнього часу безвідмовної роботи $\left(\frac{1}{\lambda}\right)$, то далі при визначенні показників ефективності вважається, що $T = \infty$. Проведені розрахунки показали, що при $T \geq 3\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ відносна похибка при визначенні показників ефективності при даному допущенні не перевищує 1 + 2 %.

Наслідок 2. Якщо $T = \infty$, $t_k = k\tau$ і $\omega(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, $f(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}$

$$P_{XB}\left(\overline{\tau,(v-1)\tau}; v\tau \middle| \xi\right) = \alpha(1-\alpha)^{v-1}, v = \overline{1,k}; \quad (20)$$

$$P_{ПП}\left(\overline{\tau,(k-1)\tau}; k\tau \middle| \xi\right) = \alpha(1-\alpha)^{v-1},\ k = 0,1,2,\ldots, \quad (21)$$

$$P_{ПН}\left(\overline{\tau,(j-1)\tau}; j\tau \middle| \xi\right) = (1-\alpha)^k \beta^{j-k-1}(1-\beta), \quad j = k+1, k+2, \ldots, \quad (22)$$

$$P_{НВ}\left(\overline{\tau,(n-1)\tau}; n\tau \middle| \xi\right) = (1-\alpha)^k \beta^{n-k}, \quad n = 1,2,\ldots, \quad (23)$$

То справедливі наступні вирази:

$$MS_1 = \frac{1-\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]}{(\lambda+\lambda_0)\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (24)$$

$$MS_2 = \frac{1}{1-(1-\alpha)\exp\left(-\lambda\tau-\lambda_0\tau\right)} \times \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(-\lambda_0\tau\right)\left[\begin{array}{l} \dfrac{\tau\left[1-\beta\exp\left[-\left(\lambda+\lambda_0\right)\tau\right]\right]}{1-\beta\exp\left(-\lambda_0\tau\right)} - \\ -\dfrac{1-\exp\left(-\lambda\tau\right)}{\lambda} \end{array} \right] + \\ + \dfrac{\lambda\left[1-\exp\left[-\left(\lambda+\lambda_0\right)\tau\right]\right]}{\lambda_0\left(\lambda+\lambda_0\right)} - \exp\left(-\lambda_0\tau\right) \times \\ \times\left[\tau + \left(\lambda\lambda_0\right)^{-1}\left(\lambda-\lambda_0\right)\left[1-\exp\left(-\lambda\tau\right)\right]\right] \end{array} \right\}; \quad (25)$$

$$MS_3 = \frac{t_{KP}\exp(-\lambda_0\tau)\left\{1-\beta\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]\right\}}{\left\{1-\beta\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right\}\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (26)$$

$$MS_6 = \frac{t_{ЛВ}\alpha\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]}{1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)}; \quad (27)$$

$$MS_7 = \frac{t_{ВВ}\left[1-\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right]\left[1-\beta\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]\right]}{\left[1-\beta\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right]\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (28)$$

$$MS_8 = \frac{t_{ПВ}(1-\beta)\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\left[1-\exp\left[-\lambda\tau\right]\right]}{\left[1-\beta\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right]\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (29)$$

де $\omega(t)$ і $f(t)$ – щільності розподілу ймовірностей (ЩРЙ) напрацювання ЛБ до прихованого і явної відмови відповідно; λ і λ_0 інтенсивність прихованих і явних відмов ЛБ відповідно.

Формули (24)–(29) виходять після підстановки у вирази (14)–(19) ЩРЙ (20) і умовних ймовірностей (21)–(23). В окремому випадку за відсутності явних відмов ($\lambda_0 = 0$) формули (24)–(29) приводяться до виразів (26)–(30).

Наслідок 3. Справедливі наступні нерівності:

$$0 < MS_2 < \min\left(\frac{\tau}{1-\beta}; \frac{\lambda}{\lambda_0(\lambda+\lambda_0)}\right); \quad (30)$$

$$0 < MS_3 < \max\left(\frac{t_{KP}}{\alpha}; \frac{t_{KP}}{1-\beta}\right);$$

$$0 < MS_6 < t_{ЛВ}; \quad (31)$$

$$0 < MS_7 < t_{ВВ};$$

$$0 < MS_8 < t_{ПВ}.$$

Нерівності (30)–(31) випливають з аналізу табл. 1, в якій наведено граничні значення виразів (24)–(29).

Приклад 1. Нехай $\tau = 4$ год, $\alpha = 0{,}001$, $\beta = 0{,}001$ і $\lambda = \lambda_0 = 0{,}25 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Потрібно розрахувати значення оцінок зверху для MS_1 і MS_2.

$$MS_1 < \min\left(\frac{4}{1-0.002}; \frac{1}{0.5\cdot 10^{-4}}\right) = 2000 \text{ год.}$$

$$MS_2 < \min\left(\frac{4}{1-0.002}; \frac{0.25\cdot 10^{-4}}{0.25\cdot 10^{-4}\left(0.25\cdot 10^{-4}+0.25\cdot 10^{-4}\right)}\right) = 4 \text{ год.}$$

З наведеного прикладу випливає, що при КП високонадійного ЛБ з малою періодичністю, основну увагу слід приділяти зменшенню умовної ймовірності «помилкового відмови», оскільки при $\tau/\alpha < 1/(\lambda + \lambda_0)$ ЛБ з імовірністю, що дорівнює одиниці, не виробляє середнього часу безвідмовної роботи. Тому при заданому значенні $\lambda + \lambda_0$ співвідношення між параметрами α і τ має бути таким, щоб виконувалася нерівність:

$$\frac{\tau}{\alpha} \geq \frac{\lambda}{\lambda+\lambda_0} \quad (32)$$

На підставі нерівності (32) можна обґрунтувати вимогу безпосередньо до умовної ймовірності «помилкової відмови» вбудованої системи контролю (ВСК) при заданих значеннях λ, λ_0 і τ:

$$\alpha \leq \tau(\lambda + \lambda_0) \quad (33)$$

Таблиця 1

Граничні значення MS_i

MS_i	$\lambda_0 = 0$				$0 < \lambda < \infty, 0 < \lambda_0 < \infty$		$\lambda_0 = \infty$
	$0 < \tau < \infty$		$0 < \lambda < \infty$		$\tau = 0$	$\tau = \infty$	
	$\lambda = 0$	$\lambda = \infty$	$\tau = 0$	$\tau = \infty$			
MS_1	$\frac{\tau}{\alpha}$	0	0	$\frac{1}{\lambda}$	0	$\frac{\lambda}{\lambda+\lambda_0}$	0
MS_2	0	$\frac{\tau}{1-\beta}$	0	¥	0	$\frac{\lambda}{\lambda_0(\lambda+\lambda_0)}$	0
MS_3	$\frac{t_{KP}}{\alpha}$	$\frac{t_{KP}}{1-\beta}$	$\frac{t_{KP}}{\alpha}$	$\frac{t_{KP}}{1-\beta}$	$\frac{t_{KP}}{\alpha}$	0	0
MS_6	$t_{ЛВ}$	0	$t_{ЛВ}$	0	$t_{ЛВ}$	0	0
MS_7	0	0	0	0	0	$t_{ВВ}$	$t_{ВВ}$
MS_8	0	$t_{ПВ}$	0	$t_{ПВ}$	0	0	0

Наприклад, при вихідних даних прикладу 1, використовуючи нерівність (32), одержуємо, що величина умовної ймовірності «помилкової відмови» ВСК має задовольняти умові: $\alpha \le 0{,}0002$.

Висновки.

1. Розроблено метод побудови моделей процесу ТОіР РЕНС ПС на «нескінченному інтервалі планування ТО», що дозволяє отримати показники ефективності експлуатації РЕНС з урахуванням наявності як прихованих, так і явних відмов. Визначені стани, в яких може перебувати РЕНС в процесі післягарантійної експлуатації. З доведеної теореми 1, отримані математичні вирази для розрахунку середньої тривалості перебування ЛБ в кожному з станів при довільному законі розподілу часу безвідмовної роботи на нескінченному інтервалі часу планування ТО. Дані вирази, на відміну від відомих, враховують не тільки показники достовірності багаторазового КП і його періодичність, а й зовнішній прояв відмов, тобто наявність явних і прихованих відмов.

2. На підставі наслідку 2 виведені формули для визначення середньої тривалості знаходження РЕНС в різних станах при експоненціальному законі розподілу часу безвідмовної роботи. Вперше отримані формули для визначення нижніх і верхніх меж цієї тривалості з урахуванням зовнішнього прояву відмов, що дозволили встановити зв'язок між показниками достовірності, періодичністю КП і інтенсивностями явних і прихованих відмов ЛБ. Це дозволяє проводити оцінку ефективності експлуатації РЕНС при відсутності достатнього обсягу статистичної інформації про надійність систем. Показано, що для високонадійних систем при малій періодичності КП негативний вплив кінцевої достовірності КП в основному пов'язано з «хибними відмовами», а для систем з низькою надійністю при великій періодичності КП цей вплив буде обумовлено «невиявленими відмовами».

3. Розроблено метод визначення коефіцієнту готовності РЕНС для довільного і експоненціального законів розподілу часу напрацювання до явної і прихованого відмов на нескінченному інтервалі планування ТО. Дані результати дозволяють оцінити ефективність стратегії обслуговування РЕНС в період післягарантійного обслуговування й обґрунтувати вимоги до достовірності ВСК.

Список літератури:

1. Drenick R.F. The Failure Law of Complex Equipment. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1960. Vol. 8, no. 4. P. 680–690. URL: https://doi.org/10.1137/0108051 (date of access: 28.03.2025).

2. Cox D.R. Renewal theory. London : Methuen, 1960. 247 p.

3. Kumar U.D. Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Boston, MA : Springer US, 2000. 490 p.

4. Scarf P.A., Deara M. Block replacement policies for a two-component system with failure dependence. *Naval Research Logistics*. 2003. Vol. 50, no. 1. P. 70–87. URL: https://doi.org/10.1002/nav.10051 (date of access: 28.03.2025).

5. Rausand M., Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2013. 672 p.

Rahulin S. V. DEVELOPMENT OF METHODS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF POST-WARRANTY OPERATION OF REDUNDANT RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS

The period of post-warranty operation is characterized by special financial and organizational relationships between the supplier and the operator. Therefore, this work proposes a method that takes into account the main technical and economic indicators of the post-warranty process of maintenance and repair. The method is described by a regenerating random process with the final number of states. On the basis of it, the average location of radio electronic navigation systems in different operating conditions is determined, which allows to obtain the main indicators of efficiency of operation of radio electronic navigation systems. During the post-warranty operation, the operator, as a rule, has a considerable amount of statistical information on the reliability of radio electronic navigation systems. Therefore, during this period it is possible to assess the intensity of the occurrence of both hidden and obvious refusals.

The efficiency of operation of aircraft is directly determined by the optimal variant of the organization of the system of maintenance and repair, the choice of which is based on solving a complex of tasks of diagnostic support, methodological, regulatory support and optimal formation of the exchange fund.

To evaluate the operational reliability of radio electronic navigation systems, there is a need to evaluate the likelihood of system failure during the flight. For this purpose, the article specifies the operational probability of failure to work at the endless planning of maintenance, taking into account the indicators of the accuracy of control, the frequency of control and the intensity of obvious and hidden failures. In order to evaluate the efficiency of different options for the organization of technical support of radio-electronic navigation systems in the post-warranty period, the corresponding functions of value were developed in operation, taking into account the fact that after the end of the guarantee obligations of the supplier, the operator himself pays for all the costs associated with the restoration of systems.

To evaluate the probabilistic indicators of the efficiency of operating systems and evaluation of critical failures, a method was developed, which allows to take into account multiple refusals of rewarding radio-electronic navigation systems.

Key words: *control systems, restoration, efficiency, easily replaceable blocks, radio electronic navigation systems.*