УДК 358.4 : 656.7

С.В. Рагулін

Кіровоградська летна академія НАУ, Кіровоград

МЕТОД ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ РЕС ПРИ ЯВНИХ І ПРИХОВАНИХ ВІДМОВАХ

В статті пропонується метод оцінки експлуатаційної надійності РЕС при явних і прихованих відмовах. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність стратегії обслуговування РЕС в період післягарантійного обслуговування й обґрунтувати вимоги до достовірності ВСК

Ключеві слова: *безвідмовна робота, експлуатаційна надійність, експоненційний закон*

Вступ

Для оцінки експлуатаційної надійності РЕС необхідно оцінювати вірогідність відмови системи протягом польоту. Для цього необхідно визначити експлуатаційну ймовірність безвідмовної роботи на нескінченному інтервалі планування ТО з урахуванням показників достовірності контролю, періодичності контролю та інтенсивності явних і прихованих відмов.

Оцінку експлуатаційної надійності РЕС будемо здійснювати за допомогою ЕВБР. Під ЕВБР будемо розуміти ймовірність безвідмовної роботи LRU на інтервалі (t_k, t) з урахуванням того, що в моменти $\overline{t_1, t_k}$ проводилось ТО, що включає КР і планове відновлення бракованого LRU, а у випадкові моменти виникнення явних відмов, неспівпадаючі з $\overline{t_1, t_k}$, проводилось позапланове відновлення відмовили систем.

Основна частина

Нехай $H(u)$ – функція відновлення процесу відновлення, утвореного послідовністю інтервалів часу між явними відмовами системи. Введемо такі позначення: $B_0(u)$ – подія, що полягає у позаплановому відновленні системи після явної відмови у момент u; $\bigcup_{u\in(t_j,t_{j+1})}\Delta_u$ – подія, яка заключається у тому, що із нескінченної послідовності подій Δ_u здійсниться, що найменше одна; $E_{ЛВ}(t_j)$ та $E_{ПВ}(t_j)$ – події, що заключаються відповідно в «хибному» і «правильному» відновленні системи в момент t_j; $P_{ЛВ}(t_j)$ та $P_{ПВ}(t_j)$ – відповідно ймовірності подій $E_{ЛВ}(t_j)$ та $E_{ПВ}(t_j)$; $P_{ВВ}(t_j, t_{j+1})$ – ймовірність позапланового відновлення системи на інтервалі (t_j, t_{j+1}); $P_E(t_k, t)$ – ЭВБР на інтервалі (t_k, t).

Подія $E_{ЛВ}(t_j)$ або $E_{ПВ}(t_j)$ здійсниться у тому випадку, якщо при КР в момент t_j система буде забракована. Позначимо через $E_B(t_j)$ подію, що заключається у відновленні системи в момент t_j. Очевидно, що:

$E_B(t_j) = E_{ЛВ}(t_j) \bigcup E_{ПВ}(t_j)$.

Теорема 1. Справедливі вирази:

– для ЕВРБ на інтервалі (t_k, t):

$$P_E(t_k,t)=\sum_{j=0}^{k}P_B(t_j)\left[1-\Phi(t-t_j)\right]\int_{t-t_j}^{\infty}P_{ПР}\left(\overline{t_{j+1}-t_j,t_{k-1}-t_j};t_k-t_j\,|\,\gamma\right)\mu(\gamma)d\gamma+$$
$$+\sum_{j=0}^{k-1}\int_{t_j}^{t_{j+1}}\left[1-\Phi(t-u)\right]\int_{t-u}^{\infty}P_{ПР}\left(\overline{t_{j+1}-u,t_{k-1}-u};t_k-u\,|\,\gamma\right)\mu(\gamma)d\gamma\, dH(u)+ \qquad (1)$$
$$+\int_{t_k}^{t}\left[1-\Phi(t-u)\right]\left[1-F(t-u)\right]dH(u);$$

– для ймовірності хибного відновлення в момент t_j:

$$P_{ХВд}(t_j)=\sum_{v=0}^{j-1}\Big\{P_B(t_v)\big[1-\Phi(t_j-t_v)\big]\int_{t-t_j}^{\infty}P_{ХВ}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{j-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg+$$

$$+\int_{t_v}^{t_{v+1}}\big[1-\Phi(t_j-u)\big]\int_{t_j-u}^{\infty}P_{ХВ}\left(\overline{t_{v+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u\,\middle|\,g\right)\mu(g)dH(u)\Big\}; \qquad (2)$$

– для ймовірності правильного відновлення в момент t_j:

$$P_{ПВд}(t_j)=1-P_{ХВд}(t_j)-\sum_{v=0}^{j-1}\Big\{P_B(t_v)\big[1-\Phi(t_j-t_v)\big]\times$$

$$\times\int_{0}^{t_j-t_v}P_{НВ}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{j-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg+$$

$$+\int_{t_j-t_v}^{\infty}P_{ПП}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{j-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg+\int_{t_v}^{t_{v+1}}\big[1-\Phi(t_j-u)\big]\times \qquad (3)$$

$$\times\left[\begin{array}{l}\displaystyle\int_{0}^{t_j-u}P_{НВ}\left(\overline{t_{v+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg+\\ \displaystyle\int_{t_j-u}^{\infty}P_{ПП}\left(\overline{t_{v+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg\end{array}\right]dH(u)\Big\};$$

– для ймовірності позапланового відновлення на інтервалі t_j, t_{j+1}:

$$P_{ППВд}(t_j,t_{j+1})=\sum_{v=0}^{j}\Big\{P_B(t_v)\big[\Phi(t_{j+1}-t_v)-\Phi(t_j-t_v)\big]\times$$

$$\times\left[\sum_{i=v}^{j-1}\begin{array}{l}\displaystyle\int_{t_1-t_v}^{t_{i+1}-t_v}P_{НВ}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{j-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg+\\ \displaystyle\int_{t_j-t_v}^{\infty}P_{ПП}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{j-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg\end{array}\right]+$$

$$+\int_{t_v}^{t_{v+1}}\big[\Phi(t_{j+1}-u)-\Phi(t_j-u)\big]\times$$

$$\times\left[\begin{array}{l}\displaystyle\int_{0}^{t_j-u}P_{НВ}\left(\overline{t_{v+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg+\\ \displaystyle+\sum_{i=v+1}^{j-1}\int_{t_i-u}^{t_{i+1}-u}P_{НВ}\left(\overline{t_{v+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg+\\ \displaystyle+\int_{t_j-u}^{\infty}P_{ПП}\left(\overline{t_{v+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u\,\middle|\,g\right)\mu(g)dg\end{array}\right]dH(u)\Big\}; \qquad (4)$$

– для ймовірності відновлення в момент t_j:

$$P_B(t_j)=P_{ЛВ}(t_j)+P_{ПВ}(t_j) \qquad (5)$$

Доведення. Із визначення

$$P_E(t_k,t)=P\left\{\bigcup_{j=0}^{k-1}\left\{\left[B(t_j)\bigcap R>t-t_j\bigcap\Xi>t_i-t_j\bigcap\left(\bigcap_{i=j+1}^{k}\Xi_i^{*}>t_i-t_j\right)\right]\bigcup\right.\right.$$

$$\left.\left.\bigcup\left[\bigcup_{u\in(t_j,t_{j+1})}B_0(u)\bigcap R>t-u\bigcap\Xi>t-u\bigcap\left(\bigcap_{i=j+1}^{k}\Xi_i^{*}>t_i-t_j\right)\right]\right\}\bigcup\right.$$

$$\bigcup\left[B(t_k)\bigcap R>t-t_k\bigcap \Xi>t-t_k\right]\bigcup\left[\bigcup_{u\in(t_k,t)}\left[B_0(u)\bigcap R>t-u\bigcap \Xi>t-u\right]\right]\Bigg\}.$$

Зважаючи на те, що явні і приховані відмови приймаються статистично незалежними, то для знаходження ймовірності $P_E(t_k,t)$ за формулою (1) достатньо показати, як визначається ймовірність події $\bigcup\limits_{u\in(t_j,t_{j+1})}\Delta_u$,

де $\Delta_u=B_0(u)\bigcap R>t-u\bigcap \Xi>t-u\bigcap\left(\bigcap\limits_{i=j+1}^{k}\Xi_i^*>t_i-t_j\right)$.

Подія Δ_u заключається у тому, що у момент u трапилась остання явна відмова і після позапланового відновлення, система більше не відмовляла, а при КР в моменти $\overline{t_{j+1}-u,t_k-u}$ признавалась працездатною.

Оскільки потік явних відмов створює процес відновлення з функцією відновлення H(u), то у відповідності з теорією відновлення і теоремою множення ймовірностей можна записати:

$$P(\Delta_u)=\left[1-\Phi(t-u)\right]\left[\int\limits_{t-u}^{\infty}P_{ПП}\left(\overline{t_{j+1}-u,t_{k-1}-u};t_k-u\,\middle|\,g\right)µ(g)dg\,dH(u)\right].$$

Інтегруючи по всіх можливих $u(t_j\le u\le t_{j+1})$ знаходимо

$$P\left(\bigcup_{u\in(t_j,t_{j+1})}\Delta_u\right)=\int\limits_{t_j}^{t_{j+1}}\left[1-\Phi(t-u)\right]\int\limits_{t-u}^{\infty}P_{ПП}\left(\overline{t_{j+1}-u,t_{k-1}-u};t_k-u\,\middle|\,g\right)µ(g)dg\,dH(u). \qquad (6)$$

Далі, застосовуючи до виразу (6) теореми додавання і множення ймовірностей, отримаємо твердження 1. Решта тверджень доводиться аналогічно.

Наслідок 1. Якщо

$$µ(¶)=ª\exp(-ª¶),\ \Phi(°)=ª_0\exp(-ª_0°), \qquad (7)$$

то справедливі співвідношення:

$$P_E(t_k,t)=\sum_{j=0}^{k}P_B(t_j)\exp\left[-(ª+ª_0)(t-t_j)\right]\left[(1-\sim)^{k-j}+\frac{ª_0}{ª+ª_0}\times\right.$$
$$\times\sum_{j=0}^{k-1}\left[\exp\left[-(ª+ª_0)(t-t_{j+1})\right]-\exp\left[-(ª+ª_0)(t-t_j)\right]\right]+ \qquad (8)$$
$$\left.+(1-\sim)^{k-j}+\frac{ª_0}{ª+ª_0}\left[1-\exp\left[-(ª+ª_0)(t-t_{j+1})\right]\right]\right];$$

$$P_{ЛВ}(t_i)=\sim\sum_{v=0}^{j-1}P_B(t_v)\exp\left[-(ª+ª_0)(t-t_j)\right]+\frac{ª_0}{ª+ª_0}\times$$
$$\times\sum_{j=0}^{k-1}\left[\exp\left[-(ª+ª_0)(t_j-t_{v+1})\right]-\exp\left[-(ª+ª_0)(t_j-t_v)\right]\right]+(1-\sim)^{j-v-1}; \qquad (9)$$

$$P_{ПВ}(j²)=(1-\quad)\left[1-P_{ЛВ}(j²)/\sim\right]. \qquad (10)$$

Доведення. При експоненційному законі розподілу напрацювання до прихованої відмови системи умовні ймовірності:

$$P_{ХВ}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{v-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,¶\right),\ P_{ПП}\left(\overline{t_{j+1}-t_j,t_{k-1}-t_j};t_k-t_j\,\middle|\,¶\right),\ P_{НВ}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{v-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,¶\right)$$

Набудуть вигляду

$$P_{ХВ}\left(\overline{t_{v+1}-t_v,t_{v-1}-t_v};t_j-t_v\,\middle|\,¶\right)=\sim(1-\sim)^{j-v-1},\ j=\overline{1,k},v=\overline{1,j-1}; \qquad (11)$$

$$P_{ПП}\left(\overline{t_{j+1}-t_j,t_{k-1}-t_j};t_k-t_j\,\middle|\,¶\right)=(1-\sim)^{k-j},\ k=1,2,\ldots; \qquad (12)$$

$$P_{НВ}\left(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{\nu-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu \middle| \xi\right) = (1-\beta)^{i-\nu} \quad {}^{j-i}, i = \overline{\nu, j-1}, t_i - t_\nu < \xi \le t_{i+1} - t_\nu, \qquad (13)$$

де α – умовна ймовірність «хибної відмови» при КР LRUна стоянці ПС; β – умовна ймовірність «не виявленої відмови» при КР LRU на стоянці ПС.

Далі, як відомо, при експоненційному законі розподілу напрацювання до явної відмови системи функція відновлення:

$$H(t) = \lambda_0 t. \qquad (14)$$

Для доведення тверджень (8)-(10) достатньо підставити в вирази (1)-(5) ПРВ (7), умовні ймовірності (11)-(13) і функцію відновлення (14) та провести відповідні перетворення.

Наслідок 2. Якщо $t_k = k\tau$, де τ – періодичність КР, і виконується умова (7), то справедливі співвідношення:

$$\begin{aligned} P_E(k\tau, t) = {} & \sum_{j=0}^{k} P_B(j\tau)\exp[-(\lambda+\lambda_0)(t-j\tau)](1-\beta)^{k-j} + \frac{\lambda_0}{\lambda+\lambda_0}\times \\ & \times\left[\exp[(\lambda+\lambda_0)\tau]-1\right] + \sum_{j=0}^{k-1}\left[\exp[-(\lambda+\lambda_0)(t-j\tau)](1-\beta)^{k-j}\right] + \\ & + \frac{\lambda_0}{\lambda+\lambda_0}\left[1-\exp[-(\lambda+\lambda_0)(t-k\tau)]\right]; \end{aligned} \qquad (15)$$

$$\begin{aligned} P_{ЛВ}(j\tau) = {} & \beta\sum_{\nu=0}^{j-1} P_B(\nu\tau) + \frac{\lambda_0}{\lambda+\lambda_0}\left[1-\exp[-(\lambda+\lambda_0)\tau]\right]\times \\ & \times\exp[-(\lambda+\lambda_0)(j-\nu-1)\tau](1-\beta)^{j-\nu-1}; \end{aligned} \qquad (16)$$

$$P_{ПВ}(j\tau) = (1-\quad)\left[1-P_{ЛВ}(j\tau)/\beta\right]. \qquad (17)$$

де kτ < t < (k+1)τ.

Доведення. Підставляючи у вирази (8)-(10) $t_k = k\tau$ після не складних перетворень, отримаємо твердження (15)-(17).

Наслідок 3. Якщо $t_k = k\tau$, $\omega(\xi)=\lambda e^{-\lambda\xi}$ і $\Phi(\rho)=0$, тобто в системі можливі лише приховані відмови, то

$$P_E(k\tau, t) = \sum_{j=0}^{k-1} P_B(j\tau)\exp[-\lambda(t-j\tau)](1-\beta)^{k-j} + P_B(k\tau)\exp[-\lambda(t-j\tau)]; \qquad (18)$$

$$P_{ЛВ}(j\tau) = \beta\sum_{\nu=0}^{j-1} P_B(\nu\tau)\exp[-(j+\nu)\lambda\tau](1-\beta)^{j-\nu-1}, \qquad (19)$$

а ймовірність $P_{ПВ}(j\tau)$ визначається з виразу (17).

Доведення. Підставляючи у вирази (15) і (16) значення λ_0, після не складних перетворень отримаємо формули (18) і (19)

Висновки

Визначено коефіцієнт готовності РЕС 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 РЕС в період післягарантійного обслуговування й обґрунтувати вимоги до достовірності ВСК.

Список літератури

1. Навігаційне забезпечення ЗС України з використанням космічних систем / Козелков С.В., Неділько С.М., Хращевський Р.В., Козелкова К.С. / монографія. – Кіровоград: КЛА НАУ, 2013.

2. Документ ІКАО (Doc 9760-AN/967)«Руководство по летной годности»

3. Чинючин Ю.М., Полякова И.Ф. Основы технической эксплуатации и ремонта авиационной техники. Часть 2.М.: МГТУ ГА, 2006. - 74 с.

Поступила в редакцію 02.11.2014

Рецензент: д.т.н., проф. В.А. Краснобаєв, ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, Полтава.

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РЭС ПРИ ЯВНЫХ И СКРЫТЫХ ОТКАЗАХ

Рагулин С.В.

В статье предлагается метод оценки эксплуатационной надежности РЭС при явных и скрытых отказах. Полученные результаты позволяют оценить эффективность стратегии обслуживания РЭС в период послегарантийного обслуживания и обосновать требования к достоверности ВСК

Ключевые слова: *безотказная работа, эксплуатационная надежность, экспоненциальный закон*

METHOD OF ASSESSMENT IN RES OPERATIONAL RELIABILITY OVERT AND COVERT FAILURES

Ragulin S.V.

In this paper we propose a method evaluation of the operational reliability of the RECs with overt and covert failures. The obtained results allow us to evaluate the effectiveness of maintenance strategies RES during post-warranty service and justify the requirements for reliability FAC

Keywords: *uptime, operational reliability, the exponential law*