

УДК 681.3(07)

С.В. Ленков,
доктор технічних наук, професор,
В.О. Осипа,
кандидат технічних наук, доцент,
С.О. Пашков,
кандидат військових наук, доцент,
Ю.В. Березовська

ТЕОРЕТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТА РЕТ ЗА РАХУНОК ПРОВЕДЕННЯ ПЛАНОВИХ РЕМОНТІВ

У статті проводиться аналіз можливості підвищення рівня безвідмовності об'єкта РЕТ за рахунок проведення планових ремонтів (ПР). Аналіз ґрунтується на моделюванні процесу ПР на заданому періоді експлуатації об'єкта. Моделюється оптимальний процес ПР, за якого забезпечуються мінімальні витрати вартості на експлуатацію під час забезпечення необхідного рівня безвідмовності об'єкта. Досліджується залежність вартості експлуатації об'єкта від заданої вимоги до рівня його безвідмовності. Отримано залежності питомої вартості експлуатації об'єкта від величини середнього наробітку на відмову об'єкта, що забезпечується за рахунок проведення ПР.

Ключові слова: надійність, радіоелектронна техніка, ремонт, вартість.

В статье проводится анализ возможности повышения уровня безотказности объекта РЕТ за счет проведения плановых ремонтов (ПР). Анализ основывается на моделировании процесса ПР на заданном периоде эксплуатации объекта. Моделируется оптимальный процесс ПР, при котором обеспечиваются минимальные затраты стоимости на эксплуатацию при обеспечении необходимого уровня безотказности объекта. Исследуется зависимость стоимости эксплуатации объекта от заданного требования к уровню его безотказности. Получены зависимости удельной стоимости эксплуатации объекта от величины средней наработки на отказ объекта, обеспечиваемой за счет проведения ПР.

Ключевые слова: надежность, радиоэлектронная техника, ремонт, стоимость.

Analysis of the possibility of an increase of the level of non-failure operation of radio-electronic object due to the planned repairs (PR) is carried out. The analysis is based on the modelling of the process of PR on the set period of the operation of an object. Optimum process of PR at which the minimum costs of the cost of an operation when providing the necessary level of non-failure operation of an object is modelled. The dependence of the cost of operation of an object on the set requirement to the level of its non-failure operation is investigated. The dependences of the specific cost of the operation of an object on the size of an average time between failures of an object are received.

Keywords: reliability, radio-electronic equipment, repair, cost.

Складний об'єкт радіоелектронної техніки (РЕТ) призначений, як правило, для тривалої експлуатації й тому вимагає в процесі експлуатації проведення на

ньому технічного обслуговування й ремонтів. У цій статті розглядаються деякі результати досліджень залежності вартості експлуатації об'єкта від рівня його безвідмовності, що підтримується за рахунок проведення ПР. Дослідження ґрунтується на застосуванні методу імітаційного статистичного моделювання, реалізованого програмно й описаного в [1].

Будемо розрізняти два види ремонтів – поточні й планові [2]. Під *поточним* ремонтом (ТР) слід розуміти ремонт, призначений для відновлення справності або працездатності об'єкта шляхом заміни або відновлення окремих елементів об'єкта. Під *плановим* ремонтом (ПР) будемо розуміти ремонт, призначений для заповнення ресурсу об'єкта. Цим ми трохи звужуємо поняття ПР, однак робимо це навмисно для зручності подальшого аналізу, що проводиться в статті. Теоретично ресурс об'єкта частково відновлюється й у результаті ТР, однак очевидно, що частка відновлюваного при цьому ресурсу досить мала.

ТР виконується у випадкові моменти часу, коли відбуваються відмови окремих елементів об'єкта. ПР плануються заздалегідь, і при їхньому здійсненні проводиться заміна (відновлення) значної кількості елементів, що може сягати 50–80 % [3]. Чим більший відсоток замінних елементів, тим більша частина ресурсу заповнює в результаті ПР.

Будемо розглядати наступну модель процесу технічної експлуатації об'єкта РЕТ. На заданому досить великому (десятьки років) періоді експлуатації об'єкта T_e виконуються ТР і ПР. ТР виконуються у випадкові моменти часу, щоразу при виникненні відмов об'єкта. Відновлення працездатності об'єкта при ТР проводиться шляхом заміни елементів, що відмовили. ПР виконуються через певні інтервали часу (наробітку) відповідно до встановлених параметрів $P_{пр}$:

$$P_{пр} = \left\{ \left\langle P_{прj}, R_{прj} \right\rangle; j = \overline{1, N_{пр}} \right\}, \quad (1)$$

де $N_{пр}$ – число ПР, що виконуються протягом періоду експлуатації T_e ; $P_{прj}$ – обсяг ПР, що тут вимірюється відсотком заміни елементів при виконанні ПР; $R_{прj}$ – міжремонтний ресурс.

Відсоток заміни елементів $R_{прj}$ визначається за формулою:

$$P_{прj} = \left| E_{прj} \right| \cdot 100 / \left| E_o \right|, \quad (2)$$

де $E_{прj}$ – підмножина конструктивних елементів об'єкта, що замінюються при j -му ПР ($E_{прj} \subseteq E_o$, де E_o – множина всіх конструктивних елементів, що включені в структурну схему надійності об'єкта). У підмножину $E_{прj}$ включаються найменш надійні елементи з E_o .

У загальному випадку параметри $P_{прj}$ й $R_{прj}$ різні для різних ПР.

Нехай показниками якості процесу експлуатації об'єкта, що нас цікавлять, є:

\bar{T}_o – середній наробіток на відмову;

\bar{c}_e – середня питома вартість експлуатації.

Обидва показники оцінюються на заданому періоді експлуатації T_e й визначаються такими виразами:

$$\bar{T}_o = 1/\bar{n}_o(T_e) = 1/\int_0^{T_e} \omega(t) dt, \quad (3)$$

де $\bar{n}_o(T_e)$ – середнє число відмов об'єкта на інтервалі $[0, T_e]$;
 $\omega(t)$ – функція параметра потоку відмов об'єкта ($t \in [0, T_e]$);

$$\bar{c}_e = \bar{c}_{тр} + \bar{c}_{пр}, \quad (4)$$

де $\bar{c}_{тр}$ й $\bar{c}_{пр}$ – середні питомі витрати вартості, що припадають на ТР і ПР відповідно.

Для складових $\bar{c}_{тр}$ і $\bar{c}_{пр}$ можна записати такі вирази:

$$\bar{c}_{тр} = \frac{1}{T_e} \sum_{i=1}^{|E_o|} \left[(C_{oi} + C_{vi}) \int_0^{T_e} \omega_i(t) dt \right], \quad (5)$$

де C_{oi} – вартість i -го елемента; C_{vi} – вартість операції відновлення i -го елемента;
 $|E_o|$ – число всіх конструктивних елементів об'єкта; $\omega_i(t)$ – параметр потоку

відмов i -го елемента ($\sum_i \omega_i(t) = \omega(t)$; $i = \overline{1, |E_o|}$);

$$\bar{c}_{пр} = \frac{1}{T_e} \sum_{j=1}^{\bar{N}_{пр}(T_e)} C_{прj}, \quad (6)$$

де $C_{прj}$ – вартісні витрати на виконання j -го ПР; $\bar{N}_{пр}(T_e)$ – число ПР, які виконуються протягом періоду експлуатації T_e .

Величина $C_{прj}$ приблизно визначається за формулою:

$$C_{прj} = C_{пр} + \sum_{i \in E_{прj}} C_{oi}, \quad (7)$$

де $C_{пр}$ – вартість накладних витрат при проведенні ПР.

Об'єкт РЕТ завжди підданий процесам зносу й старіння, і параметр потоку відмов $\omega(t)$ у загальному випадку становить зростаючу функцію часу (наробітку). У випадку, якщо ПР не проводяться, функція $\omega(t)$ має вигляд приблизно такий, як це зображено на рис. 1 а¹. При більших значеннях t функція $\omega(t)$ прагне до деякого сталого значення $\omega^{уст}$. Для об'єктів з високим рівнем надійності це стале значення взагалі можливо не досягається за час його експлуатації T_e .

Якщо в процесі експлуатації виконуються ПР, то функція $\omega(t)$ має розриви (перегони) у моменти часу $t_{рj}$, в які проводяться ПР. Очевидно, що кількість і величина цих стрибків залежить від параметрів $P_{пр}$.

¹ При припущенні, що так звані "виробничі" відмови відсутні.

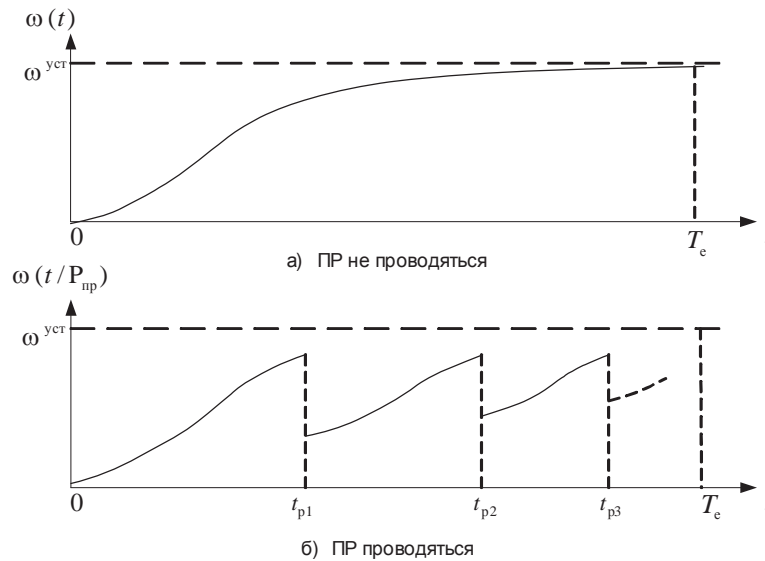


Рис. 1. Вигляд функції параметра потоку відмов за умови, якщо ПР не проводиться і якщо ПР проводиться

На рис. 1 б показаний зразковий вид функції параметра потоку відмов $\omega(t/P_{пр})$, що залежить від параметрів $P_{пр}$.

Наведені вище вирази (3)–(7), що встановлюють залежність показників \bar{T}_0 і \bar{c}_e від параметрів $P_{пр}$, можна розглядати як математичну модель процесу технічної експлуатації об'єкта РЕТ з урахуванням проведення ПР. Очевидно, що важливою складовою цієї моделі є також функція $\omega(t/P_{пр})$, яку певним чином потрібно одержувати.

У [1] зазначена математична модель, реалізована програмно, й з її використанням вирішується завдання визначення оптимальних параметрів $P_{пр}$, при яких виконуються такі умови:

$$\bar{T}_0(P_{пр}^*) \geq \bar{T}_0^{тр}; \quad (8a)$$

$$\bar{c}_e(P_{пр}^*) \rightarrow \min, \quad (8б)$$

де $P_{пр}^*$ – оптимальні параметри ПР (результат рішення задачі);
 $\bar{T}_0^{тр}$ – задане необхідне значення показника \bar{T}_0 .

У [1] розроблена практична методика рішення задачі (8). Залежності показників \bar{T}_0 і \bar{c}_e від параметрів $P_{пр}$ при рішенні цієї задачі в [1] визначаються методом імітаційного статистичного моделювання.

У розглянутому нижче прикладі задача (8) розв'язується багаторазово за різних значень $\bar{T}_0^{тр}$.

Для прикладу візьмемо простий об'єкт РЕТ, що складається з 50 елементів. Всі елементи різні за рівнем надійності, наробіток до відмови всіх елементів підпорядкований дифузійному немонотонному (DN) розподілу з параметрами $\langle \mu_i, v_i \rangle$, де μ_i – математичне очікування наробітку до відмови i -го елемента; v_i – коефіцієнт варіації ($i = 1, |E_0|$). Встановлено, що DN -розподіл є найбільш адекватною моделлю відмов для елементної бази об'єктів РЕТ [4; 5]. Значення μ_i для тестового

об'єкта задамо приблизно рівномірно в діапазоні від $\approx 3 \cdot 10^4$ до $\approx 100 \cdot 10^4$ год. Коефіцієнт варіації для елементів об'єкта РЕТ може знаходитися в діапазоні $v_i \approx 0.5$ ч 1.1 ($v_i \approx 0.5$ для механічних і електромеханічних елементів; $v_i \approx 1.1$ для інтегральних схем, напівпровідникових приладів та інших виробів електронної техніки) [5].

Для охоплення всіх можливих варіантів надійнісних властивостей об'єкта РЕТ розрахунки будемо проводити для трьох значень $v_i = 0.6; 0.8$ і 1.0 , задаючи їх однаковими для всіх елементів об'єкта. Очевидно, що задаючи в такий спосіб різні значення v , ми таким чином задаємо об'єкти РЕТ з різними надійнісними властивостями. У табл. 1 наведені значення показників \bar{T}_0 і \bar{c}_e для тестового об'єкта при різних значеннях v (оцінки, отримані за допомогою імітаційної статистичної моделі, описаної в [1]).

Таблиця 1

Оцінки показників \bar{T}_0 і \bar{c}_e для тестового об'єкта при різних значеннях v

v	\bar{T}_0 , год	\bar{c}_e , у.о./год
0,6	8500	0,01417
0,8	7300	0,01661
1,0	6300	0,01911

Подальше дослідження, що проводиться в статті, полягатиме в такому: будемо задавати різні значення необхідного рівня безвідмовності об'єкта визначеною величиною \bar{T}_0^{TP} , і для кожного з них будемо вирішувати задачу (8) (за допомогою програмного забезпечення й за методикою, викладеною в [1]). Для отриманих оптимальних параметрів P_{np}^* будемо визначати прогнозовані при цьому вартісні витрати на експлуатацію об'єкта $\bar{c}_e^* = \bar{c}_e(P_{np}^*)$ й середній наробіток на відмову $\bar{T}_0^* = \bar{T}_0^*(P_{np}^*)$. За величиною цих витрат користувач може оцінювати їхню допустимість (або неприпустимість) для досягнення необхідного рівня безвідмовності об'єкта за рахунок проведення ПР. Одночасно користувач одержує інформацію про оптимальні параметри ПР P_{np}^* , при яких досягаються відповідні значення показників \bar{c}_e^* і \bar{T}_0^* .

Всі розрахунки зробимо для трьох значень v_i (як уже зазначали). Отримані результати розрахунків наведені в табл. 2–4.

Таблиця 2

Результати вирішення задачі для тестового об'єкта при $v = 0,6$

\bar{T}_0^{TP} , год	P_{np}^* , %	\bar{N}_{np}^*	\bar{c}_e^* , у.о./год	\bar{T}_0^* , год
без ПР	–	–	0,01417	8500
9000	15	1,0	0,01749	9147
10000	35	1,0	0,02002	10226
11000	(65; 30)	(1,0; 2,0)	$\approx 0,02440$	11200
12000	35	2,2	0,02791	12138

Результати вирішення задачі для тестового об'єкта при $\nu = 0,8$

\bar{T}_0^{TP} , год	$P_{\text{пр}}^*$, %	$\bar{N}_{\text{пр}}^*$	\bar{c}_e^* , у.о./год	\bar{T}_0^* , год
без ПР	–	–	0,01661	7300
8000	35	1,0	0,02311	8109
9000	(40, 80)	(1,0; 2,1)	$\approx 0,03190$	9173
10000	(40, 65)	(2,0; 3,0)	$\approx 0,03900$	10161
11000	(45, 60)	(3,0; 4,0)	$\approx 0,04922$	11330
12000	(40, 55)	(4,1; 5,0)	$\approx 0,05840$	12180

Таблиця 4

Результати вирішення задачі для тестового об'єкта при $\nu = 1,0$

\bar{T}_0^{TP} , год	$P_{\text{пр}}^*$, %	$\bar{N}_{\text{пр}}^*$	\bar{c}_e^* , у.о./год	\bar{T}_0^* , год
без ПР	–	–	0,01911	6300
7000	65	1,1	0,03212	7235
8000	(55, 85)	(2,1; 3,0)	$\approx 0,05500$	8238
9000	(55, 70)	(4,0; 5,0)	$\approx 0,07300$	9128
10000	(55, 75)	(6,0; 7,9)	$\approx 0,10700$	10219
11000	(50, 80)	(8,1; 12,3)	$\approx 0,14400$	11322
12000	70	11,6	0,18067	12439

У стовпцях $P_{\text{пр}}^*$ і $\bar{N}_{\text{пр}}^*$ наводяться оптимальні значення відповідних параметрів ПР, при яких забезпечується вимога \bar{T}_0^{TP} (результати вирішення задачі (8)). У стовпцях \bar{c}_e^* і \bar{T}_0^* наведені значення показників, які при цьому забезпечуються.

Вирішення задачі (8) може бути неоднозначним щодо параметрів $P_{\text{пр}}$ (це обумовлено як методом статистичного моделювання, так і самим характером задачі). У випадках неоднозначності вирішення в таблицях зазначено два варіанти приблизно рівноцінних вирішень, близьких за значеннями до показників \bar{c}_e^* і \bar{T}_0^* .

Наприклад, для $\bar{T}_0^{\text{TP}} = 11000$ год при $\nu_i = 0,6$ отримані такі два вирішення:

$$P_{\text{пр}}^* = \langle 65\%, 14000 \text{ год} \rangle; \quad \bar{c}_e^* = 0,02461 \text{ у.о./год}, \quad \bar{T}_0^* = 11400 \text{ год};$$

$$P_{\text{пр}}^* = \langle \langle 30\%, 14000 \text{ год} \rangle, \langle 30\%, 7700 \text{ год} \rangle \rangle; \quad \bar{c}_e^* = 0,02443 \text{ у.о./год}, \quad \bar{T}_0^* = 11200 \text{ год}.$$

У табл. 2 ці дані наведені одним рядком. Для показників \bar{c}_e^* і \bar{T}_0^* зазначені їхні наближені значення. Оптимальні значення міжремонтного ресурсу $R_{\text{пр}}^*$ в таблицях не наведені для економії місця, крім того, ці дані неважливі з погляду цілей статті.

Для зручності аналізу отримані результати на рис. 2 подані у вигляді графіків.

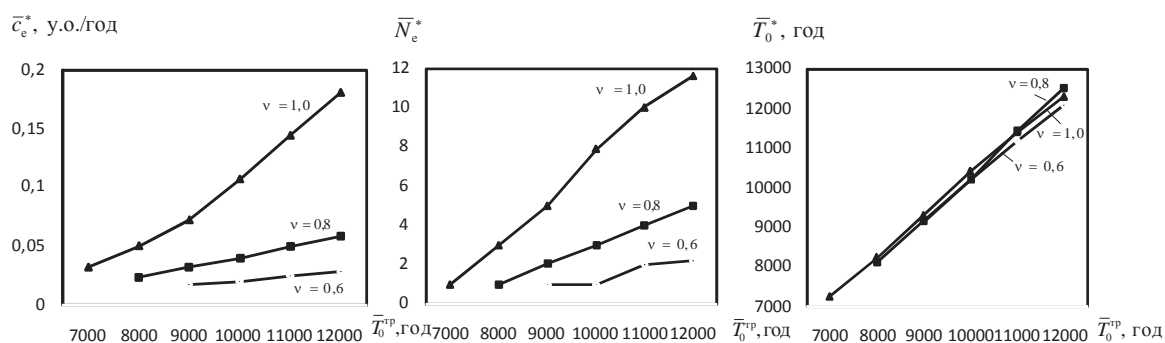


Рис. 2. Графіки залежності показників \bar{c}_c^* , \bar{T}_0^* і $\bar{N}_{пр}^*$ від заданого значення $\bar{T}_0^{пр}$

Підсумовуючи, можемо зробити такі висновки.

1. У статті отримані залежності питомої вартості експлуатації об'єкта РЕТ за умови проведення ПР від величини середнього наробітку на відмову об'єкта. Залежності отримані за умови, що ПР проводяться з оптимальними параметрами (обсягом і міжремонтним ресурсом), при яких задане значення середнього наробітку на відмову забезпечується при мінімальній питомій вартості експлуатації.

2. Характер отриманих залежностей цілком відповідає їх очевидному фізичному змісту: чим більший задається необхідний (і забезпечуваний) середній наробіток на відмову об'єкта, тим більшими є вартісні витрати на експлуатацію об'єкта (витрати на ТР і ПР). Оскільки ці залежності отримані при оптимальних параметрах ПР, то можна вважати, що ними визначаються потенційні можливості підвищення рівня безвідмовності об'єкта РЕТ за рахунок проведення ПР (якщо параметри ПР будуть відхилитися від оптимальних, необхідні витрати на ТР і ПР за інших рівних умов завжди будуть ще більшими).

3. Отримані залежності при різних значеннях коефіцієнта варіації випадкового наробітку до відмови елементів об'єкта показують, що чим більша величина коефіцієнта варіації (чим більша частка виробів електронної техніки в складі об'єкта), тим більші в середньому потрібні витрати вартості на експлуатацію об'єкта. І, навпаки, чим менша величина коефіцієнта варіації (чим більша частка в складі об'єкта механічних і електромеханічних виробів), тим менші в середньому необхідні витрати вартості на експлуатацію (ТР і ПР) за інших рівних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей : монография / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В. Банзак, В.О. Браун [и др.]; под ред. С.В. Ленкова. – Одесса : Изд-во “ВМВ”, 2014. – 256 с.
2. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – Введ. 1980-01-01. – 16 с.
3. Эксплуатация радиотехнических комплексов / под ред. А.И. Александрова. – М. : Сов. радио, 1976. – 280 с.
4. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К. : Логос, 2002. – 486 с.
5. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 1999-01-01. – 45 с.

Отримано 28.01.2014