

УДК 681.518.54.4

А.С. Кирилюк

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ ЗРК ЗА ПАРАМЕТРОМ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРИ ВІДОМІЙ МОДЕЛІ ЙОГО ЗМІНИ

Для визначення призначених термінів служби (ресурсів) радіоелектронних засобів ЗРК що проектується необхідно враховувати параметричну надійність їх функціональних вузлів та систем що обслуговуються за станом при проведенні періодичних технічних обслуговувань. Для цього в статті обґрунтовуються математичні моделі для розрахунку показників залишкового ресурсу функціональних систем радіоелектронних засобів ЗРК за параметром технічного стану при відомій моделі його зміни. Розроблені математичні моделі є узагальненням відомих параметричних моделей надійності при довільному значенні фіксованого інтервалу експлуатації, у тому числі призначеного терміну служби.

**Ключові слова:** технічний стан, залишковий ресурс, функціональна система, параметрична надійність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При розрахунках показників довговічності РЕЗ ЗРК що проектується параметрична надійність їх ФС, ФВ або не враховувалася, або її вплив враховувався орієнтовно на рівні комплектуючих виробів (к.в.) з використанням моделей раптових відмов у вигляді експонентного закону розподілу наробітку до відмови або моделей раптових і поступових відмов у вигляді суміші експонентного й усіченого нормального розподілів. У таких моделях значення параметрів закону розподілу знаходились через м.сп. і с.к.в. параметрів технічного стану к.в. для різних моментів часу в припущенні, що функція зміни параметрів технічного стану лінійна, а її значення в будь-який момент часу розподілені за нормальним законом. На етапі проектування ці коефіцієнти й параметри були орієнтовними й бралися з довідників, або за даними експлуатації відповідних виробів-аналогів. Такий підхід припускає наявність і можливість контролю визначальних параметрів для кожного к.в., або групи однорідних к.в. у відповідних тимчасових перетинах, а також знання величини коефіцієнта відносної кількості раптових і поступових відмов к.в. і-го типомінала, що, по-перше, є функцією часу, що не враховується при розрахунках і, по-друге, способи оцінки коефіцієнта не відомі, а передбачувані для користування коефіцієнти є орієнтовними, що не приводить до істотного підвищення точності розрахунків показників довговічності, зокрема показників залишкового ресурсу РЕЗ ЗРК що проектується. У зв'язку з цим виникає проблема розробки моделей для розрахунку показників залишкового ресурсу для ФВ й (або) ФС що обслуговуються за станом з використанням моделей параметричної надійності. При цьому для оцінки параметричної надійності потрібно мати інформацію як про структуру деградаційного процесу, що є моделлю зміни визначального параметра технічного стану, так і про його характеристики.

**Мета статті:** розробка моделей для розрахунку показників залишкового ресурсу ФС РЕЗ ЗРК за

ПТС при відомій моделі його зміни.

**Аналіз літератури.** Для розрахунків показників надійності к.в. РЕЗ в [1] використовують ймовірнісні (статистичні) моделі відмов. Неприйнятність таких моделей для розрахунків показників довговічності РЕЗ ЗРК що проектується була розглянута вище. Для багатьох об'єктів зміну ПТС виражають детермінованою функцією наробітку. Згідно [2] такі функції для окремих об'єктів машинобудування стандартизовані. Аналогічна тенденція спостерігається в радіоелектроніці. У цей час у довідниках по надійності [3] багатьох типів виробів електронної техніки наводяться апроксимуючі функції зміни визначальних ПТС. Для розрахунку показників надійності в [4–6] використовуються різні моделі монотонної стохастичної зміни ПТС: модель зміни ПТС із детермінованим початковим значенням параметра, модель зміни ПТС із випадковим початковим значенням параметра, модель зміни ПТС за дифузійним монотонним законом. При таких підходах для оцінки параметричної надійності потрібно мати інформацію як про структуру деградаційного процесу, що є моделлю зміни визначального параметра технічного стану ФС, так і про його характеристики.

### Основна частина

В якості показників зміни ПТС застосовуються [2]: номінальні значення параметра ( $\Pi_n$ ); граничні значення параметра ( $\Pi_r$ ), досягнення яких визначає величину ресурсу ФС ( $\Phi_B$ ) за даним параметром; найменше передвідмовне значення параметра ( $D$ ); виміряне при наробітку  $t_k$  значення параметра  $\Pi(t_k)$ ; зміна параметра  $u(t) = \Pi(t) - \Pi_n$ ; показник зміни ПТС за період приробки ( $\Delta\P$ ) і ін. Серед ПТС розрізняють прямі й непрямі параметри [2]. Прямий ПТС – це параметр ТС, що безпосередньо характеризує конкретну властивість об'єкта або його складової частини і визначальний його граничний стан. Непрямий ПТС – це параметр ТС, пов'язаний із прямим ПТС детермінованою або стохастичною залежністю, що змінюється в результаті зміни прямих ПТС.

За ступенем детермінованості залежності між м.оч. прямих й непрямих ПТС об'єкти можна розбити на:

1) детерміновані, тобто об'єкти в характеристиках ПТС яких випадкова складова несуттєва;

2) стохастичні об'єкти, в описі ПТС яких необхідне врахування випадкової складової відповідно до необхідної точності й завдання прогнозу;

3) змішані об'єкти, в описі ПТС яких є як детерміновані, так і стохастичні складові.

Нижче розглянуті математичні моделі для розрахунку показників з.р. стосовно до детермінованого й стохастичного об'єктів: при детермінованій апроксимуючій функції зміни ПТС; при заданій швидкості деградації визначального ПТС; при дифузійних монотонних стохастичних апроксимаціях зміни ПТС; при дифузійних немонотонних стохастичних апроксимаціях зміни ПТС.

1. При детермінованій апроксимуючій функції зміни ПТС. Нехай модель зміни визначального ПТС  $u(t)$  задана апроксимуючою функцією:

$$u(t) = V_c t \alpha + \Delta П,$$

де  $V_c$  – коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни ПТС;  $\alpha$  – заданий показник ступеня.

Використовуючи вище введені позначення перейдемо до моделі деградації ПТС:

$$П(t) = V_c t \alpha + П_n + \Delta П, \quad (1)$$

у якій покладемо  $П_n + \Delta П = 0$ . Тоді

$$П(t) = V_c t \alpha. \quad (2)$$

Знайдемо індивідуальний залишковий ресурс об'єкта після наробітку  $\tau$  за умови, що в момент контролю  $t = t_k$  ПТС приймає значення менше граничного  $П_r$ :

$$П(t_k) = П_k. \quad (3)$$

З (2) і (3) знаходимо величину коефіцієнта

$$V_c = П_k / t_k^\alpha. \quad (4)$$

Знайдемо величину залишкового ресурсу  $T_{зр}(\tau)$  об'єкта після призначеного ресурсу  $\tau$ . Згідно (2) маємо:

$$П_n = V_c(\tau + T_{зр}(\tau)) \alpha. \quad (5)$$

Підставляючи в (5) співвідношення (4) маємо:

$$П_n = П_k \left( \tau + T_{зр}(\tau) / t_k \right)^\alpha.$$

Вирішуючи рівняння відносно  $T_{зр}(\tau)$ , маємо:

$$T_{зр}(\tau) = t_k \left( П_n / П_k \right)^{1/\alpha} - \tau. \quad (6)$$

Формула (6) визначає залишковий ресурс  $T_{зр}(\tau)$  при заданій апроксимації (2) і одній точці контролю ПТС  $t = t_k$ ,  $П(t_k) = П_k$ . Зокрема, з формули (6) при  $\tau = t_k$ , маємо формулу

$$T_{зр}(t_k) = t_k \left[ \left( П_n / П_k \right)^{1/\alpha} - 1 \right],$$

яка наведена в [7].

2. При заданій швидкості деградації визначального ПТС.

У ряді випадків інформація про зміну визначального ПТС  $П(t)$  може бути відсутня, а проведені контролю граничного стану («технічні огляди») не дозволяють її відновити. Тоді для оцінки з.р. части-

ни ФС (ФВ) можна скористатися наступним фізичним принципом витрати ресурсу [7]: швидкість деградації визначального ПТС, починаючи з моменту  $\tau$ , прямопропорційна його значенню. Цьому фізичному принципу з "гарним наближенням" задовольняє клас "старіючих" виробів у тому випадку, коли витрата ресурсу пов'язана з деградацією визначального ПТС  $П(t)$  "зміною на  $\alpha$  відсотків за одиницю наробітку  $t$ ", починаючи з моменту  $\tau$ . Викладений фізичний принцип математично можна записати наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dП(t)}{dt} = \pm \alpha П(t), \quad t \geq \tau, \quad (7)$$

де знак "+" відповідає випадку росту параметра  $П(t)$ ;  $\alpha$  – постійна величина. Для спрощення викладу обмежимося розглядом випадку, коли  $П(t) > 0$  і по мірі витрати ресурсу виробу величина параметра зростає в часі  $t$ . Тоді, вирішуючи (7), маємо:

$$П(t) = П(\tau) \exp \alpha(t - \tau), \quad t \geq \tau. \quad (8)$$

З рівняння  $П_n = П(\tau) \exp \left[ \alpha T_{зр}(\tau) \right]$  маємо наступну формулу для індивідуального з.р.:

$$T_{зр}(\tau) = 1/\alpha \cdot \ln П_n / П(\tau), \quad П(\tau) > 0. \quad (9)$$

Для монотонно убуючого параметра маємо наступний вираз:

$$T_{зр}(\tau) = -1/\alpha \cdot \ln П_n / П(\tau), \quad П(\tau) > 0. \quad (10)$$

3.3 використання монотонних стохастичних апроксимацій зміни параметра технічного стану.

Нехай модель зміни ПТС задана у вигляді лінійної функції:

$$W_t = W_0 + Vt, \quad (11)$$

де  $V \sim N(\mu, \sigma)$ , тобто

$$P\{V \leq y\} = \Phi \left( \frac{y - \mu}{\sigma} \right). \quad (12)$$

Параметр ТС при довільному  $t$  розподілений нормально з м.оч.  $M[W_t] = W_0 + \mu t$  і дисперсією  $D^2[W_t] = \sigma^2 t^2$ .

Величину середнього з.р.  $T_{зр}(\tau)$  згідно [8] визначаємо за формулою:

$$T_{зр}(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_{\tau}^{\infty} P(t + \tau) dt. \quad (13)$$

Підставимо (12) у (13), в результаті маємо:

$$T_{зр}(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} \left[ \Phi \left( \frac{W_b - W_0 - \mu t}{\sigma t} \right) \right]^{-1} \int_{\tau}^{\infty} \Phi \left( \frac{W_b - W_0 - \mu(t + \tau)}{\sigma(t + \tau)} \right) dt.$$

Обчислення інтеграла в загальному виді важко, тому інтегрування рекомендується робити чисельними методами.

4. При дифузійній немонотонній стохастичній зміні параметра технічного стану.

Процес деградації виробів електронної техніки поряд з монотонними реалізаціями, розглянутими вище, внаслідок електричних явищ має й немонотонні реалізації. Ймовірно-фізична модель відмови такого процесу, як показано в [6], характеризу-

ється дифузійним немонотонним розподілом (DN). Співвідношення для ймовірності безвідмовної роботи виробу за ПТС із немонотонною реалізацією має вигляд [6]:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{1-at}{v\sqrt{at}}\right) - e^{2/v^2} \Phi\left(-\frac{at+1}{v\sqrt{at}}\right). \quad (14)$$

Тоді умовну ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі  $t$ , який слідує за інтервалом  $\tau$  безвідмовної роботи знайдемо за формулою:

$$P_{\tau}(t) = \frac{\Phi\left(\frac{1-a(t+\tau)}{v\sqrt{a(t+\tau)}}\right) - e^{2/v^2} \Phi\left(-\frac{1-a(t+\tau)}{v\sqrt{a(t+\tau)}}\right)}{\Phi\left(\frac{1-at}{v\sqrt{at}}\right) - e^{2/v^2} \Phi\left(-\frac{at+1}{v\sqrt{at}}\right)}. \quad (15)$$

### Висновки

Таким чином, розроблені математичні моделі для розрахунку показників залишкового ресурсу ФС РЕЗ ЗРК що проектується за ПТС при відомій моделі його зміни є узагальненням відомих параметричних моделей надійності при довільному значенні фіксованого інтервалу експлуатації, у тому числі призначеного терміну служби. Отримані розрахункові співвідношення для ймовірності безвідмовної роботи, середнього залишкового ресурсу ФС РЕЗ ЗРК за ПТС: 1) при детермінованій апроксимуючій функції його зміни; 2) при заданій швидкості деградації ПТС; 3) при монотонних стохастичних апроксимаціях зміни ПТС; 4) при дифузійній немонотонній стохастичній зміні ПТС.

Розроблені математичні моделі можна використовувати для розрахунків показників залишкового ресурсу ФС РЕЗ ЗРК що проектується із урахуванням контурів контролів їх ПТС при періодичних ТО. Результати таких розрахунків можна використовувати для визначення призначених термінів служби

(ресурсів) РЕЗ ЗРК що проектується. Крім того, отримані розрахункові співвідношення можна використовувати при рішенні завдання корегування призначених термінів служби (ресурсів) з використанням у якості вихідних даних експериментальних оцінок відповідних ПТС.

### Список літератури

1. Шор Я.Б. *Статистические методы анализа и контроля качества и надежности*. – М.: Сов. радио, 1962. – С. 213-217.
2. ГОСТ 21571-76. *Система технического обслуживания и ремонта техники. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин*. – М.: Изд. стандартов, 1979. – 28 с.
3. *Надежность электрорадиоизделий. Единый справочник. Издание восьмое. Справочник. В 3 т.* – М.: Всесоюзный НИИ «Электронстандарт», 1990.
4. Байхельт Ф., Франкен П. *Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем.* – М.: Радио и связь, 1988. – 391 с.
5. Дружинин Г.В. *Надежность автоматизированных производственных систем*. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
6. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. *Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ*. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
7. РД 50-490-84. *Методические указания. Техническая диагностика. Прогнозирование остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам*. – М.: Изд. стандартов, 1985. – 19 с.
8. Ланецкий Б.Н., Кирилук А.С., Пивнев Д.А. *Способ расчета гамма-процентного ресурса восстанавливаемых радиоэлектронных узлов и устройств // Зб. наук. пр. ХВУ*. – Х.: ХВУ, 1999. – Вып. 3(25). – С. 75-80.

Надійшла до редколегії 10.09.2008

**Рецензент:** д-р військ. наук, проф. Г.М. Дробаха, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ЗРК ПО ПАРАМЕТРУ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗВЕСТНОЙ МОДЕЛИ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

А.С. Кирилук

Для определения назначенных сроков службы (ресурсов) радиоэлектронных средств проектируемых ЗРК необходимо учитывать параметрическую надежность их функциональных узлов и систем, которые обслуживаются по состоянию при проведении периодических технических обслуживаний. Для этого в статье обосновываются математические модели для расчета показателей остаточного ресурса функциональных систем радиоэлектронных средств ЗРК по параметру технического состояния при известной модели его изменения. Разработанные математические модели являются обобщением известных параметрических моделей надежности при произвольном значении фиксированного интервала эксплуатации, в том числе назначенного срока службы.

**Ключевые слова:** техническое состояние, остаточный ресурс, функциональная система, параметрическая надежность.

### MODELS FOR THE CALCULATION OF INDEXES OF REMAINING RESOURCE OF THE FUNCTIONAL SYSTEMS OF RADIO ELECTRONIC FACILITIES OF ZRC ON THE PARAMETER OF THE TECHNICAL STATE AT THE KNOWN MODEL ITS CHANGE

A.S. Kirilyuk

For determination of the appointed terms of service (resources) of radio electronic facilities of designed ZRC it is necessary to take into account self-reactance reliability of their submachines and systems which are served on the state during the leadthrough of periodic technical services. For this purpose in the article mathematical models are grounded for the calculation of indexes of remaining resource of the functional systems of radio electronic facilities of ZRC on the parameter of the technical state at the known model of its change. The developed mathematical models are generalization of the known self-reactance models of reliability at the free value of the fixed interval of exploitation, including the appointed term of service.

**Keywords:** parameter of the technical state, remaining resource, functional system, self-reactance reliability.