

УДК 623.2.017

А.С. Кирилюк, С.И. Глок

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РЭС ЗРК ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАРАБОТКИ ДО РЕСУРСНОГО ОТКАЗА ПО ЗАКОНУ ВЕЙБУЛЛА

*Предложены математические модели, которые позволяют проводить расчеты показателей остаточного ресурса РЭС ЗРК со случайной величиной расходуемого ресурса за заданную календарную продолжительность эксплуатации. Для проведения таких расчетов предполагается известным, что наработка до ресурсного отказа распределена по закону Вейбулла.*

**Ключевые слова:** ресурс, показатели остаточного ресурса, радиоэлектронные средства.

### Введение

**Постановка проблемы.** В современных условиях актуальным является совершенствование системы технического обслуживания и ремонта РЭС ЗРК с целью снижения затрат на поддержание их работоспособного состояния и заданного уровня надежности работы. Одним из путей решения этой задачи является разработка и внедрение технического обслуживания и ремонта РЭС ЗРК по фактическому состоянию. Для этого необходимо решить задачу оценки показателей остаточного ресурса РЭС конкретного ЗРК по эксплуатационным данным.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работе [1] введено понятие остаточного ресурса восстанавливаемого технического изделия и получены расчетные соотношения показателей остаточного ресурса технического изделия в общем виде.

Вероятности  $P\{\xi > r(\tau)\}$  и  $P\{\xi > r(\tau) + t\}$  в [1] рассматриваются как модели надежности типа «нагрузка-прочность» и для их расчета используются известные соотношения [2]. Расчеты показателей остаточного ресурса РЭС конкретного ЗРК необходимо проводить для календарных продолжительностей эксплуатации РЭС комплекса и соответствующих им законам распределения суммарной наработки комплекса. В качестве распределений наработки до ресурсного отказа можно использовать типовые распределения, приведенные в стандарте [3] (нормальное, экспоненциальное, Вейбулла, логарифмически нормальное, гамма-распределение, диффузионное монотонное и диффузионное немонотонное).

В работе [4] получены расчетные соотношения показателей пожаробезопасного остаточного ресурса кабельных линий на примере экспоненциального закона распределения наработки до ресурсного отказа с параметром  $\lambda_1$ , т.е.  $\xi \sim \Gamma(\lambda_1, 1)$ , при этом суммарная наработка  $r(\tau)$  для заданного срока службы  $\tau$  конкретной кабельной линии – случайная величина с плотностью распределения  $g(x, \tau)$ . Полученные расчетные соотношения позволили сделать вывод о

том, что при экспоненциальном законе распределения наработки до ресурсного отказа показатели остаточного ресурса технических изделий не зависят от типа закона распределения суммарной наработки изделий.

**Целью статьи** является совершенствование системы технического обслуживания и ремонта РЭС ЗРК по фактическому состоянию путём решения задачи расчёта показателей остаточного ресурса РЭС ЗРК при распределении наработки до ресурсного отказа по закону Вейбулла.

### Основной материал

Получим расчетные соотношения показателей остаточного ресурса РЭС ЗРК на примере распределения наработки до ресурсного отказа по закону Вейбулла, т.е.  $\xi \sim W(\theta, \beta)$ , где  $\theta > 0$  и  $\beta > 0$  – параметры закона; суммарная наработка  $r(\tau)$  – по равномерному закону в интервале  $[a, b]$ , т.е.  $r(\tau) \sim R(a, b)$ .

Подставим в формулы (4), (5) в [4] выражения  $\bar{F}(x) = e^{-(x/\theta)^\beta}$  и  $g(x, \tau) = \frac{1}{b-a}$ .

Получим:

$$P\{\xi > r(\tau)\} = \int_a^b e^{-(x/\theta)^\beta} \cdot \frac{1}{b-a} dx; \quad (1)$$

$$P\{\xi > r(\tau) + t\} = \int_a^b e^{-\left(\frac{x+t}{\theta}\right)^\beta} \cdot \frac{1}{b-a} dx = \frac{1}{b-a} \int_a^b e^{-\left(\frac{x+t}{\theta}\right)^\beta} dx. \quad (2)$$

Подставляя (1), (2) в выражение (3) в [4] получим расчетное соотношение:

$$P\{\xi(R(a, b)) > t\} = \int_a^b e^{-\left(\frac{x+t}{\theta}\right)^\beta} dx \Big/ \int_a^b e^{-(x/\theta)^\beta} dx. \quad (3)$$

Выражения для среднего остаточного ресурса и гамма-процентного остаточного ресурса получим, подставив формулы (1), (2) в соотношение для  $T_{\text{пор}}(g(x, \tau))$  [4]:

$$T_{\text{пор}}(R(a, b)) = \left[ \int_a^b e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta} dx \right]^{-1} \int_0^b \int_a^b e^{-\left(\frac{x+t}{\theta}\right)^\beta} dx dt; \quad (4)$$

$$\int_a^b e^{-\left(\frac{x+T_{\text{пор}}(R(a,b))}{\theta}\right)^\beta} dx = 0,01\gamma \int_a^b e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta} dx. \quad (5)$$

Получение расчетных соотношений для показателей остаточного ресурса РЭС ЗРК в аналитическом виде для  $\beta > 2$  затруднительно. Рекомендуется вычисление интегралов в (3) – (5) производить методами численного интегрирования. Найдем соотношения для показателей остаточного ресурса РЭС конкретного ЗРК для частного случая  $\beta = 2$ .

Вычислим в (3)  $\int_a^b e^{-((x+t)/\theta)^\beta} dx$  и  $\int_a^b e^{-(x/\theta)^\beta} dx$  при

$\beta = 2$ . Сделаем замену переменных:  $(x+t)/\theta = u$ ,  $dx = \theta du$ . Тогда

$$\int_a^b e^{-\left(\frac{x+t}{\theta}\right)^2} dx = \theta \int_{(a+t)/\theta}^{(b+t)/\theta} e^{-u^2} du. \quad (6)$$

Так как  $\int_0^u e^{-g^2 x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2g} \Phi_1(gu)$ , где

$\Phi_1(gu) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{gu} e^{-z^2} dz$  – интеграл вероятности, выра-

жение (6) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \theta \int_{\frac{a+t}{\theta}}^{\frac{b+t}{\theta}} e^{-u^2} du &= \theta \left[ \int_0^{\frac{b+t}{\theta}} e^{-u^2} du - \int_0^{\frac{a+t}{\theta}} e^{-u^2} du \right] = \\ &= \frac{\theta\sqrt{\pi}}{2} \left( \Phi_1\left(\frac{b+t}{\theta}\right) - \Phi_1\left(\frac{a+t}{\theta}\right) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Подставим в (7)  $t = 0$ , в результате получим

$$\int_a^b e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \theta \left[ \Phi_1\left(\frac{b}{\theta}\right) - \Phi_1\left(\frac{a}{\theta}\right) \right]. \quad (8)$$

Тогда, подставляя (7) и (8) в выражение  $P_r(t) = 1 - F_r(t) = P\{\xi > r(\tau) + t\} / P\{\xi > r(\tau)\}$ , получим расчетное соотношение:

$$P\{\xi(T_{\text{пор}}(a,b)) > t\} = \frac{\Phi_1\left(\frac{(b+t)/\theta}{\theta}\right) - \Phi_1\left(\frac{(a+t)/\theta}{\theta}\right)}{\Phi_1\left(\frac{b}{\theta}\right) - \Phi_1\left(\frac{a}{\theta}\right)}. \quad (9)$$

Уравнение для гамма-процентного показателя остаточного ресурса РЭС конкретного ЗРК получим из формулы (6) в [4] и формулы (9):

$$\begin{aligned} \Phi_1\left(\frac{b+T_{\text{пор}}(R(a,b))}{\theta}\right) - \Phi_1\left(\frac{a+T_{\text{пор}}(R(a,b))}{\theta}\right) &= \\ &= 0,01\gamma \left[ \Phi_1\left(\frac{b}{\theta}\right) - \Phi_1\left(\frac{a}{\theta}\right) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассуждая аналогично, получим расчетное соотношение для среднего показателя остаточного ресурса РЭС конкретного ЗРК:

$$\begin{aligned} T_{\text{оп}}(R(a,b)) &= \left[ \Phi_1\left(\frac{b}{\theta}\right) - \Phi_1\left(\frac{a}{\theta}\right) \right]^{-1} \times \\ &\times \left[ \theta/\sqrt{\pi} \cdot \left( e^{-(a/\theta)^2} - e^{-(b/\theta)^2} \right) + a\Phi_1\left(\frac{a}{\theta}\right) - b\Phi_1\left(\frac{b}{\theta}\right) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

## Выводы

Предложенные математические модели позволяют проводить расчеты показателей остаточного ресурса РЭС конкретного ЗРК со случайной величиной расходуемого ресурса за заданную календарную продолжительность эксплуатации комплекса, в том числе и за назначенный срок службы комплекса. Для проведения таких расчетов должны быть известны законы распределения наработки до ресурсного отказа и суммарной наработки РЭС ЗРК к назначенному сроку службы.

## Список литературы

1. Бурцев В.В. Остаточный ресурс восстанавливаемых технических изделий и математические модели для расчета их показателей / В.В. Бурцев, Б.Н. Ланецкий, А.С. Кирилюк // Кібернетика та системний аналіз: сб. наук. пр. ХВУ. – 2000. – Вып. 2(28). – С. 93-96.
2. Переверзев Е.С. Случайные процессы в параметрических моделях надежности / Е.С. Переверзев. – К.: Наукова думка, 1987. – 252 с.
3. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги: ДСТУ 2862-94. – [Чинний від 1997-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 90 с.
4. Кирилюк А.С. Математические модели для расчета показателей пожаробезопасного остаточного ресурса кабельных линий / А.С. Кирилюк, О.В. Кулаков // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. НУГЗ Украины. – 2013. – Вып. 33. – С. 69-74.

Поступила в редколлегию 23.12.2013

**Рецензент:** д-р воен. наук, проф. М.А. Ермошин, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ РЕЗ ЗРК ПРИ РОЗПОДІЛУ НАРОБІТКУ ДО РЕСУРСНОЇ ВІДМОВИ ЗА ЗАКОНОМ ВЕЙБУЛА

А.С. Кирилюк, С.І. Глок

Запропоновані математичні моделі, які дозволяють проводити розрахунки показників залишкового ресурсу РЭС ЗРК з випадковою величиною ресурсу, що витрачається, за задану календарну тривалість експлуатації. Для проведення таких розрахунків передбачається відомим, що напрацювання до ресурсної відмови розподілене згідно із законом Вейбулла.

**Ключові слова:** ресурс, показники залишкового ресурсу, радіоелектронні засоби.

## CALCULATION OF INDICATORS OF THE RADIO ELECTRONIC MEANS OF ANTI-AIRCRAFT COMPLEXES RESIDUAL RESOURCE AT DISTRIBUTION OF AN OPERATING TIME TO RESOURCE REFUSAL UNDER VEYBULL'S LAW

A.S. Kirilyuk, S.I. Glock

Mathematical models which allow to carry out calculation of indicators of the radio electronic means of anti-aircraft complexes residual resource with a random variable figure of a spent resource for a given calendar duration of operation are offered. For carrying out such calculations it is supposed known that the operating time to resource refusal is distributed under Veybull's law.

**Keywords:** resource, indicator of a residual resource, radio electronic means.