

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ (РЕСУРСА) РЭС ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗРК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Б.Н. Ланецкий, В.В. Кобзев, В.В. Лукьянчук
(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

Предлагается расчетно-экспериментальный метод оценки показателей остаточного срока службы (ресурса) РЭС ЗРК с учетом условий и режимов эксплуатации на основе построения псевдонезависимых множественных регрессионных моделей изменения показателей безотказности.

остаточный срок службы, показатель безотказности, модель изменения показателя безотказности, регрессивная зависимость

Постановка проблемы. Характерными особенностями эксплуатации зенитного ракетного вооружения в Украине являются: парк однотипных ЗРК малочисленный, продолжительности эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС) ЗРК существенно различаются; отсутствует статистика о моментах наступления предельных состояний ЗРК и их РЭС; интенсивности эксплуатации РЭС разных ЗРК неодинаковы и, как правило, существенно различаются и др. Вышеуказанные обстоятельства затрудняют решение задач по поддержанию и восстановлению работоспособного (исправного) состояния РЭС ЗРК. Перспективным направлением преодоления этих трудностей является разработка и внедрение стратегии технической эксплуатации и ремонта РЭС по состоянию. При этом предусматривается назначение моментов проведения ремонтов определенного вида или продлений назначенного срока службы (ресурса) по результатам контролей предельного состояния, включающих испытания на надежность с индивидуальной оценкой величин показателей остаточного срока службы (ресурса) (о.ср.сл.(р.)). Оценивание показателей о.ср.сл.(р.) РЭС конкретного эксплуатируемого ЗРК с учетом условий и режимов эксплуатации, позволяет эксплуатировать их без установления единых для всего парка межремонтных сроков службы (ресурсов).

В связи с этим, задача разработки методов и методик индивидуальной оценки показателей о.ср.сл.(р.) РЭС ЗРК по данным, накапливаемым в процессе их эксплуатации и испытаний на надежность, учитывающих

вышеуказанные особенности, является актуальной.

Анализ литературы. В научно-технической литературе, например в [1], как правило, для оценки показателей о.ср.сл.(р.), предусматривается построение эмпирической функции распределения срока службы (ресурса) объектов, что в условиях Украины невозможно вследствие вышеприведенных причин. Решению задачи индивидуальной оценки показателей о.ср.сл.(р.) для каждого конкретного РЭС ЗРК с учетом условий и режимов его эксплуатации посвящены работы [2 – 4]. В этих работах оценку показателей о.ср.сл.(р.) предлагается проводить по известной зависимости величины одного из показателей безотказности конкретного РЭС ЗРК от продолжительности эксплуатации, изменение которой описывается линейными регрессионно-временными моделями. ЗРК и его РЭС относятся к изделиям многократного циклического применения, поэтому оценивание показателей о.ср.сл.(р.) РЭС необходимо проводить на основе моделей изменения показателей безотказности для режимов непрерывной работы и режимов включено-выключено, т.е. при переходах из выключенного состояния во включенное [5]. Кроме того, в работах [2 – 4] предполагается, что величины оценок показателя безотказности на различных подынтервалах эксплуатации, используемые в дальнейшем при построении модели его изменения, характеризуются одинаковой точностью. В процессе эксплуатации за одинаковые по величине и разнесенные по времени интервалы эксплуатации РЭС ЗРК, как правило, имеют различную суммарную наработку и суммарное количество включений, что сказывается на точности оценок этих показателей безотказности на рассматриваемых интервалах и должно учитываться при построении моделей изменения показателей безотказности.

В [4] предложено решение задачи оценки показателей надежности и индивидуального прогнозирования технического состояния редко контролируемых технических изделий с учетом режимов и условий их эксплуатации. Постановка этой задачи характеризуется следующими особенностями: большая выборка редко контролируемых изделий; невозможность локализации моментов возникновения отказов. Для ее решения разработана модель надежности редко контролируемых технических изделий в виде множественной регрессионной зависимости. Однако РЭС эксплуатируемых ЗРК отличаются от исследуемых в [4] объектов тем, что они являются восстанавливаемыми и обслуживаемыми изделиями, которые часто контролируются (по сравнению со скоростью изменения безотказности) с высоким коэффициентом полноты контроля и др. При этом имеется возможность построения многофакторных регрессионных моделей изменения показателей безотказности РЭС ЗРК по данным подконтрольной эксплуатации и испытаний на надежность. Оценки показателей о.ср.сл.(р.)

РЭС определяются как календарная продолжительность эксплуатации (суммарная наработка) РЭС, при которой прогнозируемые величины показателей безотказности достигают своих предельно допустимых значений.

Цель статьи. Разработка расчетно-экспериментального метода оценки показателей о.ср.сл.(р.) РЭС эксплуатируемых ЗРК с учетом результатов их эксплуатации и испытаний на надежность и построением псевдонезависимых регрессионно-временных моделей изменения показателей безотказности.

Основная часть. Будем считать, что проводится контроль предельного состояния ЗРК, по результатам которого установлено пребывание его РЭС в непределном состоянии. Осуществлен сбор информации о результатах эксплуатации и испытаний каждого конкретного РЭС ЗРК на надежность, включая и результаты испытаний на надежность, проведенных в рамках текущего контроля предельного состояния.

Сбор информации осуществляется по зафиксированным в эксплуатационной документации отказам РЭС ЗРК, включениям аппаратуры с проведением контролей функционирования и показаниям счетчиков времени работы, установленных на устройствах составных частей РЭС ЗРК, в моменты обнаружения отказов и в моменты их устранения (восстановления работоспособности отказавших устройств). При этом моментом восстановления работоспособности отказавшего устройства считается момент окончания проверок (автономных и комплексных), предусмотренных эксплуатационной документацией после проведения восстановительных работ.

Соответствующие показания счетчиков наработок составных частей РЭС ЗРК, преобразуются во временные интервалы наработок между отказами и значения суммарных наработок составных частей РЭС ЗРК.

Сформированные выборки наработок между отказами проверяются на аномальность. Причинами возникновения аномальных значений могут быть: нарушения условий эксплуатации или испытаний, нарушения условий сбора данных, механические ошибки при регистрации данных и подготовке их к дальнейшей обработке. Резко выделяющиеся результаты наблюдений исключаются на основе содержательного анализа условий, при которых эти наблюдения регистрировались. Если в результате такого анализа решение не принято, то используются известные формальные методы исключения аномальных наблюдений [8].

Необходимо, используя собранную и предварительно обработанную информацию, оценить показатели о.ср.сл.(р.) РЭС конкретных ЗРК.

В качестве показателей о.ср.сл.(р.) в соответствии с [1] могут быть использованы: средний о.ср.сл.(р.) или γ -процентный о.ср.сл.(р.).

Предположим, что в течение одного квартала штатной эксплуатации РЭС каждого ЗРК изменением величин показателей его безотказности можно пренебречь, а процесс возникновения отказов РЭС ЗРК мож-

но считать процессом без последствия. Безотказность РЭС эксплуатируемого ЗРК в процессе непрерывной работы характеризуется величиной показателя “средняя наработка на отказ”, а при переходе из выключенного состояния во включенное и наоборот – величиной показателя “вероятность безотказного включения”. Режимы эксплуатации РЭС ЗРК (продолжительность пребывания во включенном состоянии, цикличность применения по назначению) могут быть совместно охарактеризованы с использованием параметров – продолжительность эксплуатации, суммарная наработка и суммарное количество включений, в дальнейшем именуемых как “параметры, характеризующие режимы эксплуатации”.

Накопленные в процессе эксплуатации конкретного РЭС ЗРК результаты после их предварительной статистической обработки упорядоченно (в порядке возрастания продолжительности эксплуатации) представляются в виде табл. 1.

Таблица 1

Заголовок таблицы результатов статистической обработки

Продолжительность эксплуатации, в месяцах	Суммарная наработка, ч	Суммарное количество включений	Точечная оценка		Дисперсия оценки	
			средней наработки на отказ, ч	вероятности безотказного включения	средней наработки на отказ, ч ²	вероятности безотказного включения
...

Зафиксированные в табл. 1 данные являются исходной информацией, на основании которой в последующем осуществляется построение моделей изменения показателей безотказности. Регрессионно-временные модели, описывающие зависимости величин показателей безотказности РЭС ЗРК (средняя наработка на отказ T_0 и вероятность безотказного включения $P_{вкл}$) от параметров, характеризующих режимы его эксплуатации, могут быть представлены в виде [6]

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}_1 \mathbf{B}_1 + \mathbf{e}_1; \quad (1)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{X}_2 \mathbf{B}_2 + \mathbf{e}_2, \quad (2)$$

где $\mathbf{T} = (\hat{T}_{0,1}, \dots, \hat{T}_{0,i}, \dots, \hat{T}_{0,k_1})^T$, $\mathbf{P} = (\hat{P}_{вкл,1}, \dots, \hat{P}_{вкл,i}, \dots, \hat{P}_{вкл,k_2})^T$ – вектора размерности k_i ($i = \overline{1, 2}$), элементами которых являются рассчитанные точечные оценки показателей безотказности (k_i – общее количество вычисленных оценок); \mathbf{X}_1 , \mathbf{X}_2 – матрицы размерности $k_i \times m_i$ ($i = \overline{1, 2}$), элементами которых являются факторы (общее число которых для каждой из моделей равно соответственно m_1 и m_2), представляющие собой функции параметров, характеризующих режимы эксплуатации конкретного объекта

(продолжительность эксплуатации T_3 , суммарная наработка T , суммарное количество включений N), причем элементы первого столбца этих матриц равны 1 (для упрощения дальнейшего изложения допустим, что факторы в моделях независимы вследствие предварительно проведенной обработки); $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2$ – вектора размерности m_i ($i = \overline{1, 2}$), элементами которых являются неизвестные коэффициенты множественных линейных регрессионно-временных моделей; $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ – вектора размерности k_i , элементами которых являются случайные отклонения (остатки).

Факторами являются как непосредственно параметры, характеризующие режимы эксплуатации конкретного объекта (T_3, T, N), так и их различные комбинации ($T_3, T, N, T_3^2, T^2, N^2, T_3T, T_3N, TN, T_3TN, \dots$).

Различия в объемах суммарных наработок и суммарного количества включений РЭС ЗРК за каждый квартал их эксплуатации обуславливают различия в точности вычисленных точечных оценок показателей безотказности, а, следовательно, и в степени их “важности” применительно к построению вышеуказанных моделей. Учет этого обстоятельства приводит к тому, что ковариационная матрица остатков в каждой из вышеприведенных моделей имеет вид $\text{cov}(\mathbf{e}_i) = \mathbf{\Omega}_i$ ($i = \overline{1, 2}$), где $\mathbf{\Omega}_i$ – матрица размерности $k_i \times m_i$, элементами которой являются взаимные ковариации остатков между наблюдениями внутри соответствующей модели. С учетом допущения о независимости факторов, матрицы $\mathbf{\Omega}_i$ принимают диагональный вид, причем значения элементов главной диагонали равны дисперсиям оценок показателей безотказности РЭС ЗРК, которые вычислены по результатам его эксплуатации за соответствующий квартал.

В общем случае, даже при выполнении допущения об отсутствии корреляции между отклонениями внутри моделей (1) и (2), может иметь место корреляция между отклонениями в разных моделях, что не учитывается при оценке неизвестных коэффициентов каждой из моделей (1) и (2) в отдельности.

Независимое построение нескольких (в данном случае двух) регрессионно-временных моделей при корреляции случайных отклонений разных моделей между собой приводит к снижению точности оценок неизвестных коэффициентов моделей. Это приводит к увеличению рисков принятия ошибочных решений о моментах выхода контролируемых показателей безотказности за пределы установленных требований.

Устранить данный недостаток предлагается за счет применения аппарата псевдонезависимых регрессий [7], предусматривающего объединение “исходных” моделей (1) и (2) в одну регрессионно-временную модель вида

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{B} + \mathbf{e}, \quad (3)$$

$$\text{где } \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{P} \end{pmatrix}; \mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{X}_2 \end{pmatrix}; \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{pmatrix}; \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{pmatrix}.$$

Ковариационная матрица вектора \mathbf{e} в соответствии с определением имеет вид

$$\text{cov}(\mathbf{e}) = \mathbf{M} \left[\begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1^T & \mathbf{e}_2^T \end{pmatrix} \right] = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T & \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2^T \\ \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_1^T & \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2^T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{M}[\dots]$ – оператор математического ожидания.

Элементы главной диагонали матрицы (4) представляют собой вышеупомянутые ковариационные матрицы векторов \mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_2 соответственно, т.е. $\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T = \mathbf{\Omega}_1$ и $\mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2^T = \mathbf{\Omega}_2$.

Можно показать, что недиагональные элементы матрицы (4) могут быть определены с использованием следующих соотношений

$$\mathbf{e}_2 \mathbf{e}_1^T = \sqrt{\mathbf{W}_2 \otimes \mathbf{W}_1^T}, \quad \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2^T = \sqrt{\mathbf{W}_1 \otimes \mathbf{W}_2^T},$$

где \mathbf{W}_1 и \mathbf{W}_2 – вектора размерности k_i , элементами которых являются элементы главных диагоналей матриц $\mathbf{\Omega}_1$ и $\mathbf{\Omega}_2$ соответственно, \otimes – знак прямого кронекерова произведения матриц.

Таким образом, ковариационная матрица вектора \mathbf{e} записывается в виде

$$\text{cov}(\mathbf{e}) = \mathbf{\Omega} = \begin{pmatrix} \mathbf{\Omega}_1 & \sqrt{\mathbf{W}_1 \otimes \mathbf{W}_2^T} \\ \sqrt{\mathbf{W}_2 \otimes \mathbf{W}_1^T} & \mathbf{\Omega}_2 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Поскольку дисперсии оценок показателей безотказности можно вычислить непосредственно по результатам эксплуатации РЭС ЗРК (табл.1), то матрица $\mathbf{\Omega}$ считается известной. Тогда, для вычисления значений элементов матрицы \mathbf{B} в соответствии с обобщенным методом наименьших квадратов, можно использовать известную оценку Эйткена, которая, как показано в [7], является несмещенной и линейно эффективной

$$\mathbf{B} = \left[\mathbf{X}^T \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{X} \right]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{Y}. \quad (6)$$

Совокупность полученных значений элементов матрицы \mathbf{B} представляет собой оценки коэффициентов регрессионно-временной модели (3) и, в свою очередь, моделей (1) и (2), которые описывают зависимости величин конкретных показателей безотказности РЭС ЗРК от параметров, характеризующих режимы его эксплуатации.

Прогнозирование значений показателей безотказности РЭС ЗРК на предстоящем интервале его эксплуатации осуществляется с использова-

нием зависимостей

$$T_o = \sum_{i=0}^{m_1} b_{1,i} f_{1,i}(T_3, T, N); \quad P_{\text{вкл}} = \sum_{i=0}^{m_2} b_{2,i} f_{2,i}(T_3, T, N),$$

где $b_{1,i}$ и $b_{2,i}$ – рассчитанные значения элементов матриц \mathbf{B}_1 и \mathbf{B}_2 ; $f_{1,i}(T_3, T, N)$ и $f_{2,i}(T_3, T, N)$ – функционалы, представляющие собой факторы регрессионно-временных моделей (1) и (2) соответственно, причем $f_{1,0}(T_3, T, N) = f_{2,0}(T_3, T, N) = 1$.

Задача оценивания среднего остаточного срока службы $T_{o,\text{ср.сл}}$ РЭС эксплуатируемого ЗРК сводится к решению системы неравенств (7) относительно неизвестной продолжительности эксплуатации T_3 ,

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{m_1} b_{1,i} f_{1,i}(T_3, T, N) < T_{o,\text{пр}}; \\ \sum_{i=0}^{m_2} b_{2,i} f_{2,i}(T_3, T, N) < P_{\text{вкл.пр}}, \end{cases} \quad (7)$$

где $T_{o,\text{пр}}$ – предельно допустимое значение средней наработки на отказ; $P_{\text{вкл.пр}}$ – предельно допустимое значение вероятности безотказного включения.

При этом предполагается, что известны зависимости $T = f(T_3)$ и $N = f(T_3)$.

Величина среднего остаточного срока службы $T_{o,\text{ср.сл}}$ РЭС эксплуатируемого ЗРК определяется как разность полученного решения системы неравенств и фактической продолжительности эксплуатации РЭС ЗРК.

Средний остаточный ресурс РЭС эксплуатируемого ЗРК определяется решением системы неравенств (7) относительно неизвестной суммарной наработки T , в предположении известных зависимостей $T_3 = f(T)$ и $N = f(T)$.

Гамма-процентный остаточный срок службы (ресурс) РЭС эксплуатируемого ЗРК определяется решением системы неравенств аналогичной (7), в которой левые части неравенств представляют собой аналитические записи границ доверительных областей, рассчитанных относительно полученных моделей изменения показателей безотказности.

Вывод. Предложенный расчетно-экспериментальный метод оценки показателей остаточного срока службы (ресурса) РЭС эксплуатируемых ЗРК в отличие от известных учитывает индивидуальные особенности условий и режимов их эксплуатации, неравноточность оценок показателей безотказности, полученных по результатам эксплуатации и испыта-

ний на надежность соответственно, корреляцию остатков, возникающую вследствие того, что оценивание разных показателей надежности проводится в общем случае по одним и тем же наблюдениям и др.

Предложенный метод сводится к известным методам оценки показателей остаточного срока службы (ресурса) с использованием регрессионно-временных моделей в случаях, когда: корреляция между уравнениями регрессии отсутствует; матрицы факторов в регрессионных моделях X_1 и X_2 одинаковы; точности оценок показателей надежности, рассчитанных по результатам эксплуатации и испытаний на надежность близки и т.д.

Применение предложенного расчетно-экспериментального метода оценки показателей остаточного срока службы (ресурса) при решении задач продления назначенных сроков службы (ресурсов) РЭС эксплуатируемых ЗРК позволяет получать приемлемые погрешности оценок соответствующих показателей и обеспечить приемлемые достоверности принимаемых решений об их дальнейшей эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред.совет: В.С. Авдучевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 6: Экспериментальная отработка и испытания. / Под общ. ред. Р.С. Судакова, О.И. Тескина. – 376 с.*
2. *Ланецкий Б.Н., Бурцев В.В., Пивнев Д.А. Прогнозирование остаточного ресурса РЭС ЗРК, находящихся в эксплуатации. // Сборник трудов НПК ХВУ. – Х.: ХВУ, 1999. – С. 35-36*
3. *Раскин Л.Г. Кириченко И.О. Задача оценки и прогнозирования показателей технического состояния с учетом условий эксплуатации // Методы решения задач эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры. – Х.: ВИРТА ПВО, 1977. – С. 32-36*
4. *Раскин Л.Г. Математические методы исследования операций и анализа сложных систем вооружения ПВО. – Х.: ВИРТА ПВО, 1988. – 178 с.*
5. *Кобзев В.В. Задача оценки показателей остаточного срока службы (ресурса) РЭС ЗРК. Методика ее решения. Материалы 8-го международного молодежного форума “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”. Ч. 1. – Х.: ХНУРЭ, 2004. – С. 48.*
6. *Вучков И., Бояджијева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с.*
7. *Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.*
8. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 472 с.*

Поступила 17.02.2006

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,

