

УДК 355.02 : 519.216.3

*Павел Викторович Опенько  
Владислав Владимирович Кобзев  
Дмитрий Владимирович Фоменко*

## **ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА ПО СОСТОЯНИЮ**

### **Постановка проблемы**

Характерной особенностью стратегии технического обслуживания и ремонта (ТЭ и Р) по состоянию является то, что в процессе эксплуатации контролируется состояние конкретного объекта для своевременного принятия решений о необходимости проведения ремонта и его объеме. При этом ЗРК могут эксплуатироваться без установления межремонтных ресурсов (сроков службы) и подлежат ремонту по достижению ими соответствующего вида предельного состояния. Эффективность реализации стратегии ТЭ и Р по состоянию в значительной мере определяется своевременным обнаружением моментов перехода радиоэлектронных средств (РЭС) зенитных ракетных комплексов (ЗРК) в предельное состояние. В процессе эксплуатации надежность РЭС конкретных ЗРК ухудшается, поскольку по характеру основных деградационных процессов, приводящих изделие к предельному состоянию, РЭС ЗРК относятся к стареющим изделиям. Поэтому выход величины контролируемого показателя надежности за пределы установленных значений является одним из признаков предельного состояния РЭС ЗРК.

При отсутствии изменений в конструкции РЭС ЗРК и установленной системе ТЭ и Р показатели ремонтпригодности можно считать независимыми от продолжительности эксплуатации. Следовательно, при прогнозировании предельного состояния РЭС ЗРК необходимо исследовать изменение безотказности РЭС ЗРК, а оценки показателей долговечности конкретного РЭС ЗРК определять с использованием установленных закономерностей индивидуального изменения величин показателей безотказности (ПБ).

### **Анализ литературы**

Известные в научно-технической литературе методы оценки показателей долговечности могут быть разделены на параметрические и непараметрические. Параметрические методы [1-7]

применяются в предположении, что вид функции распределения наработки (продолжительности эксплуатации) объектов до ресурсного отказа (предельного состояния) известен заранее, а ее параметры устанавливаются по достаточно большому объему результатов эксплуатации выборок однородных объектов. Непараметрические методы могут применяться в предположении неизвестного вида функции распределения наработки до ресурсного отказа. Функция распределения наработки (продолжительности эксплуатации) до ресурсного отказа может определяться расчетно-экспериментальными методами оценки доремонтных и межремонтных ресурсов (сроков службы), которые сводятся к одному из вариантов:

- проведение экспериментальной оценки плотностей распределения наработок до отказов групп однотипных комплектующих элементов в виде суперпозиции различных плотностей распределения их интенсивностей отказов;
- построение эмпирической функции распределения продолжительности эксплуатации (наработки) РЭС ЗРК до ресурсных отказов.

Эти методы оценки показателей долговечности РЭС ЗРК разработаны применительно к регламентированной стратегии эксплуатации и планового ремонта и применяются для парка однотипных РЭС; недостаточно полно учитывают индивидуальные особенности условий и режимов эксплуатации РЭС конкретных ЗРК. Кроме того, на практике оценка показателей долговечности РЭС ЗРК по результатам организации и проведения ресурсных испытаний или эксплуатационных наблюдений затруднительна из-за того, что отсутствует статистика моментов переходов ЗРК и их РЭС в предельные состояния и, как следствие, отсутствует выборка значений ресурсов и сроков службы РЭС ЗРК, что не позволяет устанавливать законы распределения этих случайных величин; установление законов распределения ресурсов и сроков службы ЗРК и его РЭС расчетно-

экспериментальным методом по известным законам распределения ресурсов и сроков службы комплектующих изделий, определенным по результатам эксплуатационных наблюдений, приводит к большим погрешностям вследствие невозможности учета условий и режимов эксплуатации конкретных комплектующих изделий в составе радиоэлектронной аппаратуры ЗРК, его РЭС и их составных частей.

### Изложение основного материала

Для индивидуального решения задачи оценки показателей долговечности РЭС конкретных ЗРК с учетом их фактического технического состояния и надежности необходимо оценивать показатели их долговечности РЭС ЗРК с учетом конкретных режимов и условий их эксплуатации, степени влияния этих режимов и условий эксплуатации на состояние РЭС. Это оценивание целесообразно проводить с использованием зависимостей изменения ПБ от параметров, характеризующих режимы эксплуатации, например, продолжительность эксплуатации, суммарная наработка и др. При этом результаты эксплуатационных наблюдений, накопленные на совокупности интервалов эксплуатации фиксированной продолжительности, в виде совокупности оценок ПБ рассматриваются как исходные данные для построения зависимостей изменения их величин ПБ в процессе эксплуатации для прогнозирования значений на предстоящем интервале эксплуатации и, соответственно, оценивания показателей долговечности РЭС ЗРК. Наиболее проработанным математическим аппаратом, который может быть использован для решения данной задачи, являются методы регрессионного анализа [8-12]. При этом для применения этого математического аппарата целесообразно принять следующие допущения:

изменением величины контролируемых (оцениваемых) ПБ за фиксированную продолжительность интервала эксплуатации можно пренебречь, поскольку эта продолжительность несоизмеримо мала по сравнению с величиной назначенного ресурса (срока службы) объекта. При этом восстановления безотказности РЭС ЗРК после отказов предполагаются минимальными, т.е. безотказность РЭС ЗРК в результате восстановления работоспособности в пределах интервала эксплуатации фиксированной продолжительности практически не изменяется;

на совокупности интервалов эксплуатации фиксированной продолжительности величины контролируемых (оцениваемых) ПБ изменяются существенно, причем характер этого изменения заранее неизвестен и должен устанавливаться в виде моделей их изменения в зависимости от продолжительности эксплуатации и других факторов по накопленным значениям оценок ПБ.

Совокупность параметров, характеризующих режимы эксплуатации РЭС ЗРК, с учетом форм и механизмов регистрации результатов эксплуатационных наблюдений целесообразно выбирать следующей: продолжительность

эксплуатации, суммарная наработка, суммарное количество включений. Зависимость величины ПБ от значений параметров, характеризующих режимы эксплуатации, применительно к конкретному РЭС ЗРК, может быть определена математической моделью, описывающей процесс изменения безотказности РЭС ЗРК.

Построение математической модели изменения ПБ РЭС ЗРК с помощью парных регрессионно-временных зависимостей ПБ (только от суммарной наработки) существенно упрощает фактическую зависимость этих ПБ от других различных параметров, характеризующих режимы эксплуатации РЭС ЗРК, и их корреляций; наблюдаемые величины, используемые в качестве факторов при построении множественных регрессионных моделей, предполагаются независимыми, что не выполняется для выбранной совокупности параметров, характеризующих режимы эксплуатации РЭС ЗРК. Это может приводить к ошибкам в оценке показателей долговечности и, как следствие, к принятию ошибочных решений о преждевременном ремонте или о возможности (целесообразности) эксплуатации РЭС ЗРК, находящегося в предельном состоянии.

Построение закономерности изменения ПБ с использованием методов множественного регрессионного анализа предлагается осуществлять следующим образом. Продолжительность эксплуатации разбивается на интервалы эксплуатации, в течение которых характеристики безотказности считаются постоянными. Продолжительность этого интервала эксплуатации определяется исходя из того, что она должна быть:

не менее величины, достаточной для накопления приемлемого объема эксплуатационных наблюдений и последующей точечной оценки ПБ;

такой, чтобы безотказность РЭС ЗРК при эксплуатации в течение рассматриваемого интервала не могла существенно измениться;

согласована с периодичностью технических обслуживаний и механизмом учета результатов эксплуатационных наблюдений.

Для РЭС ЗРК в режиме использования по назначению целесообразно принять ее равной одному кварталу. По данным эксплуатации определяются: данные о количестве отказов за интервалы эксплуатации; значения суммарной наработки и суммарного количества включений РЭС ЗРК, соответствующие каждому  $i$ -му интервалу эксплуатации. Результаты эксплуатации РЭС ЗРК за каждый интервал, зафиксированные в эксплуатационной документации, используются для получения соответствующих количественных оценок ПБ и дисперсий этих оценок. Расчетные соотношения для вычисления оценок ПБ и дисперсий приведены в [3]. Значения точечных оценок ПБ РЭС эксплуатируемых ЗРК и дисперсий этих оценок далее используются при построении зависимостей этих показателей от параметров, характеризующих режимы эксплуатации.

Сгруппированная информация может быть представлена как совокупность  $k$  точек четырехмерного пространства  $\{\hat{R}_i, T_{(i)}, T_{3(i)}, N_{(i)}\}$ , где  $\hat{R}_i$  – оценка показателя безотказности  $R$  на  $i$ -ом интервале эксплуатации. Далее строятся зависимости оценок ПБ РЭС ЗРК от параметров, характеризующих режимы его эксплуатации  $\{R = f(T, T_3, N)\}$ .

В общем случае эти регрессионно-временные модели могут быть представлены в виде [8-12]:

$$R = BX + e; \quad (1)$$

где  $R = (\hat{R}_1, \dots, \hat{R}_i, \dots, \hat{R}_k)^T$  – вектор размерности  $k$ , элементами которого являются рассчитанные точечные оценки ПБ ( $k$  – общее количество вычисленных оценок);

$B$  – вектор размерности  $m$ , элементами которого являются неизвестные коэффициенты множественной регрессионно-временной модели;

$X$  – матрица размерности  $m \times k$ , элементами которой являются факторы (общее число которых в модели равно  $m$ ), представляющие собой функции параметров, характеризующих режимы эксплуатации конкретного объекта (продолжительность эксплуатации  $T_3$ , суммарная наработка  $T$ , суммарное количество включений  $N$ );

$e$  – вектора размерности  $k$ , элементами которых являются случайные отклонения (остатки).

Факторами в модели (1) являются параметры, характеризующие режимы эксплуатации конкретного объекта ( $T_3, T, N$ ), и их различные комбинации

$$\left( T_3, T, N, T_3^2, T^2, N^2, T_3 \times T, T_3 \times N, T \times N, T_3 \times T \times N, \dots \right).$$

Общее количество факторов  $m$  и неизвестных коэффициентов регрессии зависит от количества выбранных параметров, характеризующих режимы эксплуатации РЭС ЗРК, и порядка регрессионной модели. Так, общее количество факторов  $m$  (неизвестных коэффициентов регрессии), при использовании трех параметров, характеризующих режимы эксплуатации РЭС ЗРК, для линейной регрессии первого порядка равно 4 ( $m=4$ ); для линейной регрессии второго порядка –  $m=10$ ; для линейной регрессии третьего порядка –  $m=20$  и т.д.

Очевидно, что точность и достоверность оценок показателей долговечности будет определяться точностью построения модели изменения безотказности РЭС ЗРК, которая, в свою очередь, характеризуется точностью оценок неизвестных коэффициентов регрессии. Увеличение количества неизвестных коэффициентов регрессии при ограниченном объеме эксплуатационных наблюдений приводит к снижению точности их оценок [8-12, 13]. В [9-11] проведен анализ последствий “перебора” и “недобора” количества исходных факторов. Также следует отметить, что изначально параметры, характеризующие режимы

эксплуатации РЭС ЗРК, являются зависимыми (положительная взаимозависимость), что нарушает предпосылки классического линейного регрессионного анализа. При этом возможна ситуация, когда некоторые из исходных факторов незначительно влияют на величину ПБ (т.е. являются избыточными) или окажутся линейно зависимыми. Обработка данных с использованием всего количества исходных (включая избыточные и линейно зависимые) факторов приводит к необоснованным затратам. Степень представительности выборки одного и того же объема обратно пропорциональна размерности факторного пространства. Большая размерность факторного пространства не допускает наглядного представления данных, а также затрудняет интерпретацию полученных результатов.

Известны различные способы исключения избыточных исходных факторов на основе проверки значимости их коэффициентов, вычисления коэффициентов всех возможных регрессионных моделей, последовательного включения (исключения) исходных факторов в рассматриваемую множественную линейную регрессионную модель с учетом их взаимного влияния, переход к иному факторному пространству [8-15] и т.д. Применение большинства из этих способов усложняется тем, что снижение размерности факторного пространства зачастую может приводить к затруднениям в интерпретации результатов моделирования.

Кроме того, по результатам прогнозирования необходимо устанавливать величины назначенных ресурсов и сроков службы, которые непосредственно связаны с такими параметрами, характеризующими режимы эксплуатации, как суммарная наработка и продолжительность эксплуатации.

Другими словами, после определения структуры модели в новом факторном пространстве может потребоваться возврат в исходное факторное пространство. Это может повлечь возникновение новых ошибок, связанных с переходами из одного факторного пространство в другое и обратно, что, в свою очередь может снизить точность и достоверность прогнозирования безотказности РЭС ЗРК.

Перспективным в принятии решения выбора значимых факторов и, соответственно, исключения избыточных факторов, является использование метода группового учета аргументов [16]. Применительно к прогнозированию изменения ПБ РЭС ЗРК алгоритм отыскания модели оптимальной структуры будет состоять из следующих основных шагов.

Совокупность значений оценок ПБ РЭС ЗРК на различных фиксированных интервалах эксплуатации разбивается на обучающую и проверочную (при наличии достаточного количества наблюдений совокупность оценок может разбиваться на три группы – обучающую, проверочную и экзаменационную). Множества

индексов  $\ell$  и  $c$  из общей совокупности  $W$ , которые удовлетворяют условиям  $\ell \cup c = W$ ,  $\ell \cap c = \emptyset$ , обозначают оценки, принадлежащие соответственно обучающей и проверочной выборкам.

Разбиение выборки представляется в виде

$$X_W = \begin{pmatrix} X_\ell \\ X_c \end{pmatrix}, R_W = \begin{pmatrix} R_\ell \\ R_c \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $X_W$  – вся совокупность факторов, представляющих собой функции параметров, характеризующих режимы эксплуатации конкретного объекта;

$X_\ell, X_c$  – совокупность факторов, принадлежащая обучающей и проверочной выборкам соответственно;

$R_W$  – вся совокупность оценок ПБ конкретного РЭС ЗРК;

$R_\ell, R_c$  – совокупность оценок ПБ конкретного РЭС ЗРК, принадлежащая обучающей и проверочной выборкам соответственно.

В качестве базовой модели назначается полином (1), который и описывает зависимость величины оценки ПБ конкретного РЭС ЗРК от параметров, характеризующих режимы его эксплуатации. Экспертным методом может быть принято решение о необходимости увеличения количества элементов вектора факторов за счет добавления нелинейных преобразований отдельных параметров. Базовая модель линейна относительно коэффициентов модели и нелинейна относительно факторов.

Также экспертным методом выбирается целевая функция — внешний критерий, описывающий качество модели [17].

Модели-претенденты порождаются с учетом заранее введенного ограничения на длину полинома базовой модели. Например, степень полинома базовой модели на не должно превышать заданное число.

Рассчитываются неизвестные коэффициенты конкурирующих моделей по внутреннему критерию, т.е. критерию, вычисляемому с использованием обучающей выборки.

Следует отметить, что на каждом интервале эксплуатации величины суммарных наработок и количества включений, могут существенно различаться. Это, в свою очередь, приводит к различной точности полученных оценок ПБ РЭС ЗРК и нарушению одной из основных предпосылок классического линейного регрессионного анализа о равенстве дисперсий наблюдений. Поэтому рассмотрение результатов эксплуатационных наблюдений за различные интервалы эксплуатации и испытаний на безотказность как равных с точки зрения их информационной ценности приведет к неточному построению математической модели изменения безотказности РЭС ЗРК и, как следствие, к ошибкам при прогнозировании значений ПБ на предстоящем этапе эксплуатации.

В связи с этим при вычислении неизвестных коэффициентов регрессионной зависимости необходимо применять взвешенный метод наименьших квадратов, который предполагает переход к новым переменным, удовлетворяющим классическим предположениям [8-11, 13]. Тогда ковариационная матрица остатков в модели, построенной по обучающей выборке записывается как  $\text{cov}(e_\ell) = \Omega_\ell$ , где  $\Omega_\ell$  — матрица, элементами которой являются взаимные ковариации остатков между наблюдениями внутри обучающей выборки.

С учетом допущения о независимости факторов, матрица  $\Omega_\ell$  принимает диагональный вид, причем значения элементов главной диагонали равны дисперсиям оценок ПБ РЭС ЗРК, которые принадлежат обучающей выборке и вычислены непосредственно по результатам его эксплуатации за соответствующие интервалы эксплуатации. Тогда матрица  $\Omega_\ell$  считается известной и для вычисления значений элементов матрицы  $B_\ell$ , в соответствии с обобщенным методом наименьших квадратов, можно использовать известную оценку Эйткена

$$B_\ell = [X_\ell^T \Omega_\ell^{-1} X_\ell]^{-1} X_\ell^T \Omega_\ell^{-1} R_\ell, \quad (3)$$

которая, как показано в [10], является несмещенной и линейно эффективной. Совокупность полученных значений элементов вышеуказанной матрицы представляет собой рассчитанные по обучающей выборке оценки коэффициентов регрессионно-временной модели, которая описывает зависимости величин конкретных ПБ РЭС ЗРК от параметров, характеризующих режимы его эксплуатации. При усложнении модели внутренний критерий не дает минимума для моделей оптимальной сложности, поэтому для выбора окончательной модели он не пригоден.

Для выбора модели с оптимальной структурой вычисляется качество конкурирующих моделей. При этом с использованием рассчитанных на обучающей выборке коэффициентов в соответствии с назначенным внешним критерием производится вычисление ошибки на проверочной выборке. При прогнозировании ПБ РЭС ЗРК предлагается использовать критерий регулярности. В соответствии с этим критерием оптимальной считается такая модель, которая обеспечивает минимум среднеквадратической ошибки  $\Delta^2(c)$  на проверочной выборке при параметрах модели, вычисленных на обучающей выборке

$$\Delta^2(c) = (\Omega_c^{-1} R_c - B_\ell \Omega_c^{-1} X_c)^T (\Omega_c^{-1} R_c - B_\ell \Omega_c^{-1} X_c) \quad (4)$$

где  $\Omega_c$  — диагональная матрица, элементами которой являются дисперсии оценок ПБ РЭС ЗРК, которые принадлежат проверочной выборке и вычислены непосредственно по результатам его эксплуатации за соответствующие интервалы эксплуатации.

В качестве одного из вариантов внешнего критерия можно использовать модификацию критерия регулярности – критерий предсказательной способности. При этом исходная совокупность разбивается не на две, а на три выборки – обучающую, проверочную и экзаменационную. В рамках критерия вычисляется среднеквадратическая ошибка на экзаменационной выборке, которая не использовалась ни при расчете коэффициентов, ни при выборе моделей [18].

Когда регрессионная модель специфицирована и оценены ее параметры, она может быть применена для прогнозирования безотказности РЭС ЗРК и, как следствие, момента перехода его в предельное состояние РЭС ЗРК.

### Выводы

Таким образом, предложенная процедура построения математической модели изменения ПБ в

процессе эксплуатации РЭС ЗРК расширяет известные аналогичные процедуры [1,2,4,6,7], и в отличие от них:

во-первых – учитывает, что в качестве исходных данных для построения моделей могут использоваться неравноточные результаты оценивания ПБ по данным эксплуатации;

во-вторых – предлагает вместо используемых ранее парных линейных регрессионно-временных моделей изменения показателя надежности от продолжительности эксплуатации (суммарной наработки) осуществлять построение множественной регрессионно-временной модели, описывающей зависимость изменения ПБ от совокупности параметров, характеризующих режимы эксплуатации объектов, что обеспечивает более полный учет специфических особенностей РЭС ЗРК.

### Литература

**1. Гаскаров Д.В.** Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалевский. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с. **2. ГОСТ 27.302-86.** Надежность в технике. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 20 с. **3. Надежность** и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / [Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др.] – М.: Машиностроение, 1989. – Т.6: Экспериментальная отработка и испытания. – 376 с. **4. РД 50-490-84.** Методические указания. Техническая диагностика. Прогнозирование остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 19 с. **5. Садыхов Г.С.** Показатели остаточного ресурса и его свойства / Г.С. Садыхов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1985. – №4. – С.138-143. **6. Зубарев В.В.** Математические методы оценки и прогнозирования технических показателей эксплуатационных свойств радиоэлектронных систем. / В.В.Зубарев, А.П. Ковтуненко, Л.Г. Раскин. – К.: Книжкове видавництво НАУ, 2005. – 184 с. **7. Раскин Л.Г.** Задача оценки и прогнозирования показателей технического состояния с учетом условий эксплуатации / Л.Г.Раскин, И.О. Кириченко. // Методы решения задач эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры. – Харьков: ВИРТА ПВО, 1977. – С.32 – 36.

**8. Айвазян С.А.** Прикладная статистика. Исследование зависимостей. / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с. **9. Вучков И.** Прикладной линейный регрессионный анализ. / И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с. **10. Демиденко Е.З.** Линейная и нелинейная регрессии. / Демиденко Е.З. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с. **11. Дрейпер Н.** Прикладной регрессионный анализ. Книга 1. / Н. Дрейпер, Г. Смит – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с. **12. Себер Дж.** Линейный регрессионный анализ. / Себер Дж. – М.: Мир, 1980. – 456 с. **13. Адлер Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с. **14. Александров В.В.** Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. / В.В. Александров, Н.Д. Горский. – Ленинград: Наука, 1983. – 208 с. **15. Лоули Д.** Факторный анализ как статистический метод. / Д. Лоули, А. Максвелл. – М.: Мир, 1967. – 144 с. **16. Ивахненко А.Г.** Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. / Ивахненко А.Г. – Киев: Наук. думка, 1982. – 296 с. **17. Ивахненко А.Г.** Помехоустойчивость моделирования. / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 216 с. **18. Ивахненко А.Г.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.

У статті розглянута можливість застосування відомих методів оцінки показників довговічності для вирішення завдання прогнозування граничного стану радіоелектронних засобів зенітного ракетного комплексу при експлуатації за технічним станом. Представлена процедура побудови математичної моделі зміни показника безвідмовності в процесі експлуатації з використанням методу групового урахування аргументів, яка більш повно враховує специфічні особливості радіоелектронних засобів зенітного ракетного комплексу.

*Ключові слова:* метод групового урахування аргументів, радіоелектронні засоби, зенітний ракетний комплекс, експлуатація за технічним станом.

The possibilities of application of known methods for estimating the life to the task of forecasting the ultimate state of radio-electronic means of the anti-aircraft missile system during the operation status of the requested technical. A procedure for constructing a mathematical model of change of reliability in service with the Group Method of Data Handling, which is more fully into account the specific characteristics of radio-electronic means of the anti-aircraft missile system.

*Key words:* Group Method of Data Handling, radio-electronic means, anti-aircraft missile system, operation on a technical condition.