

УДК 621.369.6:82.629.004

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ УВД С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ УСЛОВИЙ

В.Е. ЕМЕЛЬЯНОВ

В работе представлена модель оценки характеристик безопасности радиолокационных станций (РЛС), функционирующих в различных эксплуатационных условиях, обусловленных влиянием различных внешних возмущающих воздействий. Показана возможность оценки уровня эксплуатационных расходов по величине дисконтируемой стоимости, зависящей от выбросов полезного сигнала, определяемых внешними воздействиями.

**Ключевые слова:** восстановление, внешние воздействия, функционирование в различных средах, дисконтируемая стоимость, вероятностные метрики.

В процессе технической эксплуатации радиолокационных станций (РЛС) УВД зачастую возникают ситуации, когда тип восстановления аппаратуры зависит от фиксируемого функционального состояния системы. Такие восстановления не всегда могут считаться совершенными ввиду воздействия внешней среды, носящего случайный характер, т.е. после них РЛС возвращается в нормальное состояние с некоторой вероятностью. Кроме этого, частичная потеря работоспособности (вырожденное состояние) не всегда устраняется путем профилактических мероприятий (ПМ) или аварийных ремонтов (АР). В этом случае важной представляется оценка временных интервалов нахождения РЛС в различных состояниях, оцениваемая как фактор, максимизирующий среднюю прибыль от использования системы [1].

Представляется возможным использование аппарата марковских процессов для оценки функционального состояния РЛС. Предположим, что число градаций внешней среды равно  $S$ , а пространство состояния РЛС описывается вектором  $P$ , являющимся вероятностной метрикой случайного процесса (СП)  $X(t)$ .

Интересующие нас показатели безотказной РЛС можно записать с помощью системы дифференциальных уравнений, имеющих векторную запись вида

$$\dot{P} = SP, \quad (1)$$

где  $S$  – матрица, состоящая из  $S^2$  подматриц  $S_{ij}$ . При условии, что РЛС имеет  $\eta$  состояний в каждой внешней среде, общее число состояний системы равно  $\eta_k = S\eta$ . В свою очередь  $S_{ij}$  является подматрицей, у которой все элементы представляются интенсивностями переходов из внешней среды  $I$  во внешнюю среду  $j$ .

Для определения функционального состояния РЛС введем подматрицу  $S_i$ , в которой элемент  $jq$  ( $j \in \overline{1, q}$ ) представляет собой интенсивность перехода из состояния  $q$  в состояние  $j$  во внешней среде  $i$ . Элемент  $a_{ij}$  этой матрицы определяется соотношением  $a_{ij} = \sum_{k=1}^{\eta_k} a_{jki}$ .

Для первичных РЛС ГА третьего поколения (типа «Сокол–М») особенностями построения являются:

- применение двух приемопередающих каналов с разносом частот;
- применение двухлучевой диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости;
- применение истинно-когерентного метода СДЦ;
- резервирование каждого из полуконструктивных элементов.

Изменение условий эксплуатации, вызванное, например, изменением электромагнитной обстановки (ЭМО), ошибками при выполнении ПМ и др., естественно влияет на состояние оборудования и его эксплуатационные характеристики.

Исследуем состояние РЛС, функционирующую в пространстве состояний  $O_s = \{1, 2\}$ . Динамику изменения состояния изобразим на рис. 1.

Очевидно, что для состояния среды функционирования РТС справедливы следующие условия: отказов нет – 1,5; отказ 1-го полукомплекта – 2,6; 2-го – 3,7; отказ всей системы – 4,8.

В данном случае справедливо выполнение следующей системы равенств:

$$\left. \begin{aligned} \lambda^1_{12} = \lambda^1_{34} = \lambda^1_1; & \quad \lambda^1_{13} = \lambda^1_{24} = \lambda^1_2; \\ \mu^1_{21} = \mu^1_{43} = \mu^1_1; & \quad \mu^1_{31} = \mu^1_{42} = \mu^1_2; \\ \lambda^2_{56} = \lambda^2_{78} = \lambda^2_1; & \quad \lambda^2_{57} = \lambda^2_{68} = \lambda^2_2; \\ \mu^2_{65} = \mu^2_{87} = \mu^2_1; & \quad \mu^2_{75} = \mu^2_{86} = \mu^2_2; \\ \xi_{15} = \xi_{26} = \xi_{17} = \xi_{48} = \xi_{12}; & \quad \xi_{51} = \xi_{62} = \xi_{73} = \xi_{84} = \xi_{21} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

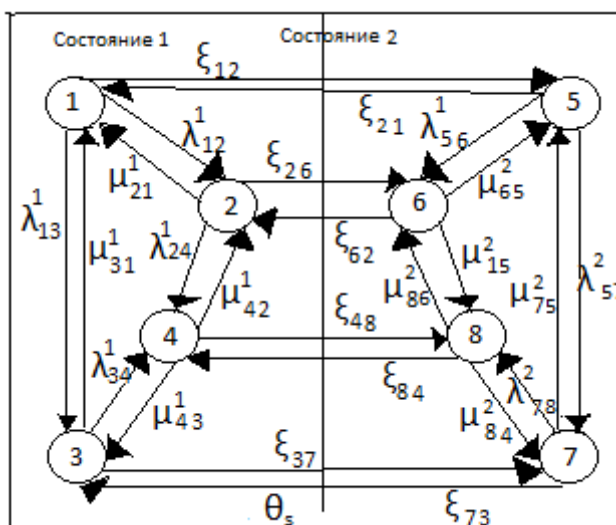


Рис. 1. Диаграмма переходов полукомплектов РТС

При этом имеем:

$$S_{11} - S_{21} = \begin{pmatrix} -(\lambda^1_1 + \lambda^1_2) & \mu^1_1 & \mu^1_2 & 0 \\ \lambda^1_1 & -(\mu^1_1 + \lambda^1_2) & 0 & \mu^1_1 \\ \lambda^1_2 & 0 & -(\mu^1_2 + \lambda^1_1) & \mu^1_1 \\ 0 & \lambda^1_2 & \lambda^1_2 & -(\mu^1_2 + \mu^1_1) \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$S_{21} = \text{diag}(\xi_{12}, \xi_{12}, \xi_{12}, \xi_{12}). \quad (4)$$

$$= S_{22} - S_{12} \begin{pmatrix} -(\lambda^2_1 + \lambda^2_2) & \mu^2_1 & \mu^2_2 & 0 \\ \lambda^2_1 & -(\mu^2_1 + \lambda^2_2) & 0 & \mu^2_1 \\ \lambda^2_2 & 0 & -(\mu^2_2 + \lambda^2_1) & \mu^2_1 \\ 0 & \lambda^2_2 & \lambda^2_2 & -(\mu^2_2 + \mu^2_1) \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$S_{12} = \text{diag}(\xi_{21}, \xi_{21}, \xi_{21}, \xi_{21}). \quad (6)$$

В выражениях (2)-(6) значения  $\xi_j^t$  представляют собой частоту перехода из состояния  $j$  в состояние  $t$ , а  $\lambda_i^t$  и  $\mu_i^t$  – интенсивности отказов и восстановления первого и второго полуккомплектов РТС.

Предположим, что в пространстве  $\theta_s = \{1, 2\}$  состояние 1 означает стандартные внешние условия, а состояние 2 – любые неблагоприятные в каком-либо смысле внешние условия. Результаты обработки статистических данных, полученных автором, позволяют считать, что во втором состоянии и надежность функционирования РЛС подчиняется распределению Вейбулла с возвращающей интенсивностью отказов [2]. Если параметр масштаба обозначить через  $\alpha$ , а параметр состояния через  $\beta$ , то в соответствии с [3] интенсивность отказов выразится формулой

$$Z_s(t) = \alpha^s \beta_s t^{\lambda_s - 1}, \lambda_s > 1. \quad (7)$$

Соответственно для марковского процесса  $\{W_s(t)\}$  в  $\theta_s$  при переходе во второе (неблагоприятное) состояние внешней среды имеем

$$Z_s(t) = C_s(t) \alpha^s \beta^{\lambda_s} t^{\lambda_s - 1}, \quad (8)$$

где коэффициент  $C_s$  определяется соотношением

$$C_s = \begin{cases} C_{1s} = 1 & \forall W_s(t) \in \theta_{s1}; \\ C_{2s} = 1 & \forall W_s(t) \in \theta_{s2}. \end{cases}$$

Надежность любого из полуккомплектов РЛС при отсутствии обслуживания определяется формулой

$$R_s(t) = P\{x_s(\tau) = 1, 0 \leq \tau \leq t\} = \exp \left[ - \int_0^t \alpha^s \beta^{\lambda_s} \tau^{\lambda_s - 1} C_s(\tau) d\tau \right]. \quad (9)$$

Надежность РТС при выполнении функциональной задачи запишем как

$$H = M \langle P\{1 - \prod_{i=1}^k [1 - p_i(t)]\} \rangle, 0 \leq t \leq T. \quad (10)$$

где  $M \langle \dots \rangle$  означает математическое ожидание.

Определим надежность при выполнении задачи любым из полуккомплектов. Обозначим  $V_i(t)$

$$V_i(t) = M \left\langle \left\{ 1 - \exp \left[ - \int_t^T c(\tau) \psi(\tau) d(\tau) \right] \right\} \right\rangle, \quad (11)$$

где

$$\psi(\tau) = \begin{cases} \alpha \beta^\alpha \tau^{\alpha - 1}, & 0 \leq \tau \leq t_1; \\ \alpha \beta^\alpha (\tau - t_1)^{\alpha - 1}, & t_1 \leq \tau \leq t_2; \\ \alpha \beta^\alpha (\tau - t_n)^{\alpha - 1}, & t_n \leq \tau \leq T. \end{cases} \quad (12)$$

Опуская промежуточные выкладки, окончательно получим

$$H = 1 - \prod_{s \in n} \{ \sum_{i \in m} P_{is} \exp[ - \sum_{k \in n_s + 1} (t_{ki} - t_{ks} - 1)^{2s} ] \}. \quad (13)$$

В выражении (8) коэффициент  $C_{is}$  имеет смысл дисконтированной стоимости замены любого полуккомплекта РЭС, определяемой интервалом времени  $\Delta t = t_{ki} - t_{ks}$ , и, следовательно, позволяет определить изменение уровня эксплуатационных расходов для  $\theta_s = \{1, 2\}$ .

Модель позволяет оценить величину отличия эксплуатационных расходов для различных условий функционирования РЭС, на основании которой, в свою очередь, возможна разработка рекомендаций по оптимизации мероприятий по ТО радиолокаторов.

Заметим, что значения  $\xi^t$  при известном уровне (допустимых значениях) параметров полезного сигнала  $Y$  могут быть найдены с помощью оценок среднего числа выбросов  $N(Y, T)$  за время  $T$ . Если известна совместная функция распределения вероятности (ФРВ) для случайной функции и ее производной  $F(Y(t), \dot{Y}(t))$ , то

$$N(Y, T) = \int_0^T \int_0^\infty \dot{y} F(Y, j) dj dt. \quad (14)$$

Вероятность выполнения условия  $y \leq y_n$ , где  $y$  – измеряемый параметр, а  $y_n$  – заданный пороговый уровень, определим, воспользовавшись разложением негаусовского закона распределения вероятностей случайной величины (СВ) по полиномам  $H_m$  Эрмита [4], вычисляемым через производные гаусовского закона распределения

$$P(Y < y) = F(y) = \Phi(y - m/\delta) + \varphi(y - m/\delta) \sum_{n=3}^\infty \frac{(-1)^n C_n}{n!} H_{n-1}(y - m/\delta), \quad (15)$$

где  $\Phi(x)$  – интеграл Лапласа;  $\varphi(x)$  – плотность распределения вероятности (ПРВ) нормально распределенной СВ ( $x$ ) с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией;  $C_n$  – коэффициент разложения;  $M, \delta$  – математическое ожидание и СКО СВ ( $y$ ) соответственно.

На практике обычно используются статистические моменты до четвертого порядка. Тогда, подставляя в (15) известные выражения [4] для коэффициентов разложения  $C_n$  и полиномов Эрмита  $H_n$ , а также ограничиваясь первыми тремя членами в (15), получим

$$\hat{P}(y < y_n) \approx \Phi(x_n) - \left[ \frac{\beta_3}{3! (x_n^2 - 1)} + \frac{\beta_4}{4! (x_n^3 - 3x_n)} \right] \varphi(x_n), \quad (16)$$

где  $\hat{P}$  – оценка СВ  $P$ ;  $\beta_3$  и  $\beta_4$  – коэффициенты асимметрии и эксцесса соответственно.

По известным  $m, \delta, \beta_3, \beta_4$  с помощью (16) можно получить оценку вероятности непривышения уровнем  $y$  заданного порогового значения  $y_n$ . Для оценки относительной погрешности  $\Delta P$  значений  $S$ , получаемых по формуле (16), можно получить оценку вероятности для негаусовских законов распределения, используемых для описания технических параметров РЭС: логарифмически нормального  $F_1(y, \mu, \delta)$ , гамма-распределения  $F_2(y, a)$  и распределения Вейбулла  $F_3(y, B)$ , где  $\mu, \delta_1, a, b$  – параметры распределения.

Указанные законы распределения охватывают широкий класс известных законов распределения:  $\chi$  – квадрат, распределение Вейбулла и распределение Релея.

Соответствующие значения оценок  $\hat{P}_1, \hat{P}_2, \hat{P}_3$  и относительных погрешностей определяются с помощью (15) и имеют вид

$$\Delta P_i = |F_i(y_n) - \hat{P}_i(y_n)| / F_i(y_n), \quad i=1,3.$$

Отметим, что для оценки безотказности РЛС, определяемой, например, по отношению (10), необходимо учитывать время превышения порогового уровня.

Предложенная модель позволяет произвести квалиметрию функционального состояния РЛС, на основе которой, в свою очередь, можно выработать рекомендации процесса технической эксплуатации рассматриваемых средств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lakner A., Anderson R. An analytical approach to determining optimum reliability and maintainability requirement // Radio elect. 1978, v 18, № 7/8, p.p. 355...368.
2. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. - М.: Радио и связь, 1988.
3. Левин Б.Р., Шварц В.Г. Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. - М.: Радио и связь, 1985.

4. Королук В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Тюрбин А.Ф. Справочник по теории вероятности и математической статистике. - М.: Наука, 1985.

#### **EVALAUTION MODEL OF THE FUNCTIONAL CONDITION OF THE RADAR STATIONS ATC, CONSIDERING EXTERNAL CHANGES**

**Emelyanov V.E.**

The article deals with specification evaluation model of radars reliability which operate in different working conditions, resulting from exposure to various external disturbances. The assessment possibility of the operating expenses level according to the value which depends on the emission efficiency of the signal which is determined by external influences is also shown.

**Key words:** restoration, external influences, functioning in different environments, discounted price, probability of metrics.

#### **Сведения об авторе**

**Емельянов Владимир Евгеньевич**, 1951 г.р., окончил КИИГА (1974), доцент, доктор технических наук, профессор кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, автор более 100 научных работ, область научных интересов – техническая эксплуатация радиоэлектронных систем, функционирующих в сложной электромагнитной обстановке.