

УДК 629.7.052: 629.396 (075.8)

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СРЕДСТВ РТОП И ЭС

В.Е. ЕМЕЛЬЯНОВ, С.Н. СМОРОДСКИЙ

В работе рассматривается модель оценки качественного уровня профилактического обслуживания средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи, в основу которой положена оценка коэффициента готовности при минимизации дисконтируемой стоимости анализируемых процессов.

Ключевые слова: переходные вероятности, оптимальный период технического обслуживания, профилактические мероприятия, аварийный ремонт, дисконтируемая стоимость.

В работе [1] предложен подход по обоснованию детерминированного периода замен «стареющих» элементов, максимизирующий коэффициент оперативной готовности средств РТОП и ЭС.

В настоящей статье авторы распространяют предлагаемую методику на случай анализа различных фаз жизненного цикла оборудования, а именно аварийного ремонта и профилактического обслуживания, характеризующихся плотностями распределения вероятности (ПРВ), функциями распределения вероятности (ФРВ) и интенсивностями: U_1 с V_1 и μ_1^{-1} и U_2 с V_2 и μ_2^{-1} соответственно. При этом считается, что известна ФРВ безотказной работы $\bar{F}(t)$ и ФРВ отказа $1 - \bar{F}(t)$ с ПРВ $f(t)$ и интенсивностью v^{-1} .

Считая, что поведение системы рассматривается на интервале времени $[t, t + x]$ естественно предположить, что оптимальным моментом времени проведения соответствующих мероприятий может считаться время T_{opt} , когда эксплуатационная надежность оборудования будет наибольшей.

Воспользуемся выражением для вероятности безотказной работы $p(x, t)$ на интервале времени $[t, t + x]$, полученным в работе [2]

$$p(x, t) = \bar{F}(t)\bar{Z}(t) + [V_{01}(t) * V_{10}(t) + V_{02}(t) * V_{20}(t)]p(t) + \int_0^t U_{01}(u)[U_1(t+x-u) - U_1(t-u)]du + \int_0^t U_{02}(u)[U_2(t+x-u) - U_2(t-u)]du, \quad (1)$$

где * означает операцию свёртки;

$Z(t)$ - ФРВ необходимого для проведения профилактического обслуживания (ПО);

$$V_{01} = \bar{F}(t)dZ(t);$$

$$V_{02} = \bar{Z}dF(t);$$

$$V_{10} = V_1(t);$$

$$V_{20} = V_2(t).$$

После преобразования получим

$$p(x, t) = 1 - n_{01}(t)\bar{V}_1(t+x) - n_{02}(t)\bar{V}_2(t+x), \quad (2)$$

где $n_{0j} = [1 - V_{01}(t)V_{10}(t) - V_{02}(t)V_{20}(t)]^{-1}$, при этом $j = 1, 2$.

Предполагая, что $Z(t) = 0$ при $t < T$ и $Z(t) = 1$ при $t \geq T$, запишем (2) в виде

$$p(x, t) = \lim_{s \rightarrow 0} SP(x, S) = 1 - \alpha_1 \Psi_1 - \alpha_2 \Psi_2, \quad (3)$$

где $P(x, S)$ - отображение по Лапласу функции $p(x, t)$;

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= F(T) / [\mu_1^{-1} F(T) + \mu_2^{-1} \bar{F}(T) + \int_0^T \bar{F}(T) dt]; \\ \Psi_2 &= \bar{F}(T) / [\mu_1^{-1} F(T) + \mu_2^{-1} \bar{F}(T) + \int_0^\infty \bar{F}(T) dt]; \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где Ψ_i - ожидаемое число восстановлений в единицу времени в стационарном состоянии.

Отметим, что ответ на вопрос, является ли найденное значение T_{opt} корректным для всего периода службы оборудования или при продлении ресурса. будем искать в рамках выбираемых дисциплин обслуживания. Предположим, что нам известны вероятности переходов системы из состояния i в состояние j q_{ij} .

В [2] приведено доказательство существования конечного и единственного значения оптимального времени профилактического обслуживания T_{opt} , максимизирующего функцию $p(x, t)$ и удовлетворяющего условию

$$\begin{aligned} \alpha_2 = & \left\{ [F(t)(\mu_1^{-1} + \mu_2^{-1}) + \int_0^T F(t) dt](\alpha_1 - \alpha_2) \right\} \lambda(T) - \\ & - [(\alpha_1 - \alpha_2) F(t) \lambda(T) (\mu_1^{-1} + \mu_2^{-1})] - \alpha_2 \lambda(T) (\mu_1^{-1} + \mu_2^{-1}), \end{aligned} \quad (5)$$

при этом $0 < T_{opt} < \infty$ (ПО не задано);

$$\lambda(\infty) \leq \Lambda;$$

$$\lambda(t) = f(t) / F(t) - \text{интенсивность отказов};$$

$$\Lambda_1 = \alpha_1 [v_1(\alpha_1 - \alpha_2) + \alpha_2 \mu_2^{-1} + \alpha_2 \mu_1^{-1}]^{-1}.$$

Проанализируем уровень эксплуатационных расходов для средств РТОП и ЭС с длительным периодом эксплуатации. Обозначим C_1 - расходы на восстановление; C_2 - расходы на ПО; C_3 - расходы для оборудования, отказавшего к моменту времени t и не восстановленного за $(t + x)$. При этом ожидаемые удельные затраты запишем в виде

$$C(T) = C_1 \Psi_1 + C_2 \Psi_2 + C_3 [1 - p(x, t)] = \frac{C_1 F(T) + C_2 \bar{F}_2(T) + C_3 [\alpha_1 F(t) + \alpha_2 \bar{F}(t)]}{\mu_1^{-1} F(T) + \mu_2^{-1} \bar{F}(T) + \int_0^T \bar{F}(t) dt}. \quad (6)$$

Далее определим T_{opt} , минимизирующее (6).

В соответствии с [1] предположим, что

$$\begin{aligned} \Lambda_2 = & (C_1 + C_3 \alpha_1) / \{ (C_1 \mu_2^{-1} + C_2 \mu_1^{-1}) + C_3 (\alpha_1 \mu_2^{-1} + \alpha_2 \mu_1^{-1}) + v^{-1} [(C_1 - C_2) + C_3 (\alpha_1 - \alpha_2)] \}^{-1}, \\ & C_1 > C_2; \quad C_1 / \mu_2 > C_2 / \mu_1; \quad \alpha_1 / \mu_2 > \alpha_2 \mu_1. \end{aligned}$$

Тогда будем иметь

$$\begin{aligned} C_2 + \alpha_2 C_3 = & [F(T) \mu_1^{-1} + \bar{F}(t) \mu_2^{-1}] [(C_1 - C_2) + C_3 (\alpha_1 - \alpha_2)] \lambda(t) - \{ C_1 F(T) + C_2 \bar{F}(t) + \\ & + C_3 [\alpha_1 F(t) + \alpha_2 \bar{F}(t)] \} (\mu_1^{-1} + \mu_2^{-1}) \lambda(t) - [(C_1 - C_2) + C_3 (\alpha_1 - \alpha_2)] F(T), \end{aligned} \quad (7)$$

при этом $\lambda(\infty) > \Lambda_2$;

$$0 < T_{opt}; \quad T_{opt} = \infty \text{ (ПО не определено);}$$

$$\lambda(\infty) \leq \Lambda_2.$$

Предположим, что цикл отказов от какого-либо средства РТОП и ЭС с длительным периодом эксплуатации определен значением ПРВ $f(j)$, а вероятность того, что восстановление завершено в j -м цикле, равняется $\eta_1(t)$ со средним значением

$$1/\mu_2 = \sum_{j=1}^{\infty} j\eta_2(t) \text{ (в случае наличия ПО).}$$

Определим готовность $p(n, N)$ как вероятность того, что средство работоспособно в N -м цикле, при этом в противоположном случае ремонтируется в $(N+n)$ -м цикле.

Если средство функционирует в течение n_j циклов, а затем проводится плановое ПО, то выражение для коэффициента готовности имеет вид

$$p(N, N_0) = 1 - \frac{\varepsilon_1 \sum_{j=1}^{n_0} f(j) + \varepsilon_2 \sum_{j=n_0+1}^{\infty} f(j)}{\mu_1^{-1} \sum_{j=1}^{n_0} f(j) + \mu_2^{-1} \sum_{j=n_0+1}^{\infty} f(j) + \sum_{k=1}^{n_0} \sum_{j=k+N}^{\infty} f(j)}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=k+N}^{\infty} \eta_1(j)$ и $\varepsilon_2 = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=k+N}^{\infty} \eta_2(j)$, $k = 1, 2, \dots$

Тогда можно записать

$$\Lambda_3 = \varepsilon_1 / [V^{-1}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \varepsilon_1 \mu_2^{-1} + \varepsilon_2 \mu_1^{-1}]. \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) и, считая, что $\lambda_k = f(k) / \sum_{j=1}^{\infty} f(j)$ - возрастающая функция интенсивности

отказов, можно предположить существует конечное и единственное решение n_0^* при выполнении следующих условий

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2, \quad 1 \leq n_0^* \leq \infty, \quad \lambda_k > \Lambda_3.$$

Если $\lambda(\infty) \leq \Lambda_3$, оптимальное время ПО $n_0^* = \infty$.

Ожидаемые затраты при этом запишем в виде

$$C(N, N_0) = \frac{C_1 \sum_{j=1}^{n_0} f(j) + C_2 \sum_{j=n_0+1}^{\infty} f(j) + C_3 [C_1 \sum_{j=1}^{n_0} f(j) + C_2 \sum_{j=n_0+1}^{\infty} f(j)]}{\mu_1^{-1} \sum_{j=1}^{n_0} f(j) + \mu_2^{-1} \sum_{j=n_0+1}^{\infty} f(j) + \sum_{k=1}^{n_0} \sum_{j=k}^{\infty} f(j)}. \quad (10)$$

В рамках принятых предположений о состояниях средства и, считая, что состояние 0 является работоспособным, можно найти вероятностные метрики пребывания системы в каждом из возможных состояний P_i ($i = \overline{0, 2}$). Уравнения Колмогорова для последних будут иметь вид

$$p_0 = p_1 \mu_2 + p_2 \mu_1 - 2p_0 \lambda; \quad p_1 = p_0 \lambda - p_1 \mu_2; \quad p_2 = p_0 \lambda - p_2 \mu_1. \quad (11)$$

Переходя в (11) к стационарному режиму находим

$$p_0 = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 \mu_2 + \lambda(\mu_1 + \mu_2)}; \quad p_1 = \frac{\lambda \mu_1}{\mu_2 [\mu_1 \mu_2 + \lambda(\mu_1 + \mu_2)]}; \quad p_2 = \frac{\lambda \mu_2}{\mu_1 [\mu_1 \mu_2 + \lambda(\mu_1 + \mu_2)]}, \quad (12)$$

а для коэффициентов готовности, считая, что система либо пригодна в момент t_1 и (или) t_2 , либо, в противном случае, ремонт завершен, либо в интервале $[t_1, t_1 + x_1]$ или $[t_2, t_2 + x_2]$ собственно, получаем

$$p(x_1, t_1, x_2, t_2) = F(t_2) + q_{01}(t_1) \cdot q_{10}(t_1) \cdot p(x_1, t_1, x_2, t_2) + \int_0^{t_2} q_{01}(u)[U(t_1 - x_1 - u) - U(t_1 - u)]du + \int_{t_1}^{t_2} q_{01}(u)p(t_2 - u)du + \int_{t_1 + x_1}^{t_2} q_{01}(u)[U(t_2, x_2 - u) - U(t_2 - u)]du, \quad (13)$$

где $q_{01}(t) = f(t)$; $q_{10}(t) = f(t)$; $p(t) = q_{10}(t) \cdot [1 - q_{01}(t)q_{10}(t)]^{-1} \cdot \bar{F}(t)$

Соотношение (13) можно распространить на любое количество интервалов путем суммирования второго и третьего членов на всех интервалах, а именно

$$p^{(n)}(x_1, t_1, x_2, t_2 \dots x_n, t_n) = F(t_n) + q_{01}(t_1) \cdot q_{10}(t_1) \cdot p^{(n)}(x_1, t_1, x_2, t_2 \dots x_n, t_n) + \int_0^{t_i} q_{01}(u)[U(t_1 + x_1 - u) - U(t_1 - u)]du + \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_i + x_i}^{t_{i+j}} [q_{01}(u)U(t_i + x_i - u) - U(t_i - u)]du + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{t_i + x_i}^{t_{i+j}} q_{01}(u)p^{(n-1)}(t_{i+1} - u, t_{i+2} - u, \dots t_n - u)du, \quad (14)$$

где $p^{(n)} = (t_1, t_2, \dots t_n)$ является вероятностью работоспособного состояния в отдельных n точках.

Качественный уровень ПО или АР можно оценить, используя соответствующие статические данные или соотношения интервалов времени, получаемые с помощью (12), в виде критерия минимизации дисконтируемой стоимости вида

$$C_0 = M[C(N, N_0)] / M[T_{np.}],$$

где $M[\dots]$ - математическое ожидание;

T_{np} - время вынужденного простоя средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В.Е., Аксёнов К.В. Оптимальные политики обслуживания, максимизирующие коэффициент готовности // Научный Вестник МГТУ ГА, серия «Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техник. Безопасность полетов», 2000, № 32. С. 83-89.
2. Kapur P.K., Bhalla V.K. Optimum maintenance policies maximizing service reliability // Microelectr. Reliab, 1996, v. 36, № 28. Pp. 87-95.

QUALITY ASSESSMENT MAINTENANCE OF FRTS AND ES

Emelyanov V.E., Smorodskiy S.N.

This article deals with the assessment model of the quality of preventive maintenance of the means of radiotechnical flight support and telecommunications which is based on the evaluation of the availability while minimizing the discounted value of the analyzed processes.

Keywords: transition probabilities, the optimal period of maintenance, preventive measures, emergency repairs, discounted cost.

REFERENCES

1. **Emel'yanov V.E., Aksjonov K.V.** Optimal'nye politiki obsluzhivaniya, maksimiziruyushhie koeffitsient gotovnosti. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA, seriya «Jekspluatacija vozdushnogo transporta i remont aviacionnoj tehnik. Bezopasnost' poletov»*, 2000, № 32. Pp. 83-89. (In Russian).

2. **Kapur P.K., Bhalla V.K.** *Optimum maintenance policies maximizing service realibility*. Microelectr. Reliab, 1996, v.36, № 28, Pp. 87-95.

Сведения об авторах

Емельянов Владимир Евгеньевич, 1951 г.р. окончил КИИГА (1974), доктор технических наук, профессор кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, автор более 110 научных работ, область научных интересов – техническая эксплуатация радиотехнических систем, функционирующих в сложной электромагнитной обстановке.

Смородский Станислав Николаевич, 1984 г.р., окончил ГТУ Комсомольск-на-Амуре (2006), инженер по радиолокации, радионавигации и связи группы АС УВД МИ АУВД, автор 6 работ, область научных интересов – техническая эксплуатация интегрированных АС УВД.