

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ФОРМИРОВАНИЮ СМЕШАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Ю. Т. Зырянов, В. В. Лебедев, Д. Н. Ледовских, И. Г. Рязанов

Введение

Одним из путей повышения качественных показателей технического состояния (ТС) РТС на протяжении жизненного цикла при одновременном снижении расходов на эксплуатацию является переход на ТО по состоянию с периодическим контролем параметров. Основными целями совершенствования ТО РТС являются: повышение эффективности использования имеющихся сил и средств в процессе эксплуатации и поддержание техники в работоспособном и боеготовом состоянии; восстановление исправности (работоспособности) РТС в установленные сроки и продление ресурса.

Существующая организация планирования и управления ТС РТС имеет ряд недостатков: многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на РТС приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации объекты имеют различное фактическое состояние, в связи с чем наработка или календарный срок службы не характеризуют однозначно ТС объекта в процессе эксплуатации; техническое обслуживание при эксплуатации РТС проводится с обязательным совмещением по месту и времени установленных видов ТО одинаковых по наименованию и периодичности на всех составных частях техники, не учитывая их эксплуатационно-технические характеристики; низкая ремонтпригодность техники, приводящая к значительным затратам на ТО за период эксплуатации; необходимость поддержания показателей боевой готовности РТС на заданном уровне в условиях сокращения материальных, временных и трудовых затрат на ТО [1, 2].

В настоящее время на практике при эксплуатации РТС все большее применение находят методы управления с периодическим контролем параметров, учитывающие их фактическое состояние. При этом необходимо отметить, что ни один из методов управления ТС не реализуется без проведения профилактики, и каждый из них имеет свою специфику при определении сроков и объемов ПР. Это определяет актуальность задачи планирования и управления профилактикой. Цель управления профилактикой можно сформулировать как обеспечение заданного уровня готовности и эффективности применения РТС при минимальных затратах на эксплуатацию.

Формализованная постановка задачи

Формализованная постановка задачи по разработке смешанной системы управления техническим состоянием представлена следующим образом:

– необходимо сформировать смешанную систему управления техническим состоянием РТС, состоящего из $S = \{s_i, i = \overline{1, S}\}$ элементов, в наибольшей степени удовлетворяющую множеству эксплуатационно-технических характеристик

$$\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_\eta\},$$

где Γ – множество эксплуатационно-технических характеристик; γ_η – η -я характеристика; η – число характеристик;

– на уровне элемента s_i необходимо определить последовательность ϵ^{s_i} проведения ПР

$$\epsilon^{s_i} = \langle t_1^{s_i}, t_2^{s_i}, \dots, t_m^{s_i} \rangle,$$

где – $t_m^{s_i} > t_2^{s_i} > t_1^{s_i}$ периодичность проведения ПР; m – общее число проверок (контроля), зависящее от конкретного выбранного метода управления ТС и ресурса Γ элемента.

Смешанная система управления ТС для элементов РТС включает все базовые методы ТО и является комбинацией всех m проверок. В общем случае для РТС, состоящей из S элементов

$$E = \epsilon^{(1)} x \epsilon^{(2)} x \dots x \epsilon^{(s)},$$

где E – комбинация последовательностей ПР.

Результаты исследований

Пусть имеется множество ПР $Q = \{q_n\}, n = \overline{1, N}$, выполнение которых обеспечивает управление ТС РТС при эксплуатации по ресурсу достаточное для эффективного применения объекта по назначению и достижению заданного уровня его надежности. При эксплуатации по состоянию с контролем параметров в зависимости от ТС – ξ , установленного с достоверностью d , может быть выбрано любое подмножество ПР $\{q_n\}$. Тогда средние удельные затраты на проведение ТО $R_{уд}$, зависящие от решений, принимаемых с учетом текущего ТС – ξ_0 , запишутся в виде $R_{уд}(\xi_0, d, q_n)$.

Обозначим через $P(\tau, \xi_0, d, q_n)$ – вероятность безотказной работы на заданном интервале времени τ кратному периоду ТО, которая определяется с учетом текущего технического состояния РТС ξ_0 в момент t , установленного с достоверностью d . Тогда критерии, характеризующие методы управления по техническому состоянию, будут формализованы следующим образом: минимум удельных затрат на проведение ПР $R_{уд}(\xi_0, d) = \min_{q_n, n \in N} \{R_{уд}(\xi_0, d, q_n)\}$ при заданной вероятности безотказной работы объекта при эксплуатации по состоянию с контролем параметров $P(\tau, \xi_0, d, q_n) \geq P_{зад}(\tau)$; максимум вероятности безотказной работы объекта $P(\tau, \xi_0, d_n) = \max_{q_n, n \in N} \{P(\tau, \xi_0, d, q_n)\}$ при заданном значении удельных затрат при эксплуатации по состоянию с контролем уровня надежности $R_{уд}(S_0, d, q_n) \leq R_{зад}$.

Классификация методов управления ТС по соответствующим критериям проводилась с учетом конкретизации набора ПР $\{q_n\}, n \subseteq N$.

Исходными данными для организации ТО являются: $Q = \{q_N\}$ – объем ПР, проводимых при ТО; $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$ – множество эксплуатационно-технических характеристик объекта; τ – интервал времени между ТО; ε – показатель эффективности, характеризующий метод управления техническим состоянием по наработке. В качестве показателя эффективности предложен коэффициент технического использования, характеризующий долговременное нахождение объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

Модель управления техническим состоянием РТС по наработке (рис. 1) реализует принцип управления по возмущению (входного параметра) $X(t)$, возникающему под действием внешней среды.

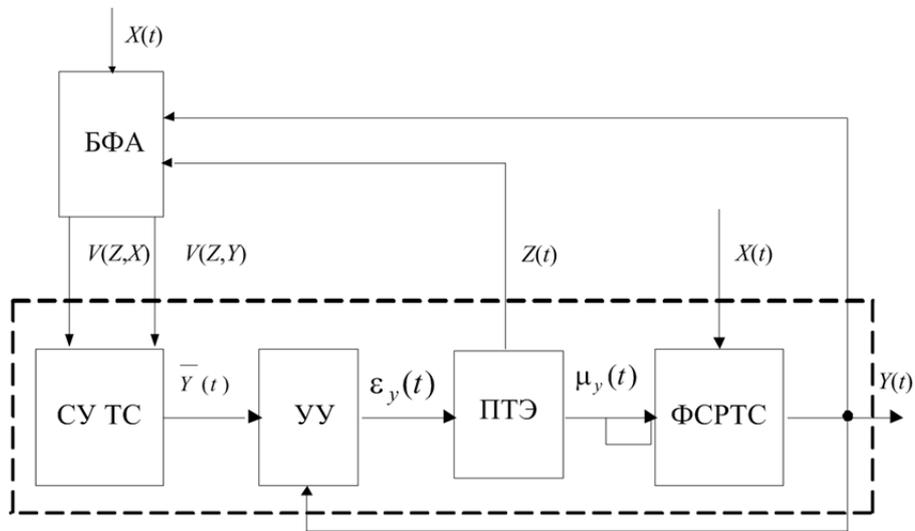


Рис. 1. Модель управления техническим состоянием РТС по наработке

На рис. 1 обозначено: БФА – блок формирования алгоритмов; СУ ТС – система управления ТС; УУ – устройство управления; ОУ – объект управления; ФСРТС – функциональная система РТС; ПТЭ – процесс технической эксплуатации. По разомкнутой схеме управления производится ТО, основанное на выполнении постоянных объемов ПР через заранее запланированные интервалы календарного времени. Модель управления техническим состоянием РТС с контролем пара-

метров реализует принцип управления по отклонению регулируемой величины (выходного параметра) $Y(t)$, которая сравнивается с задающим воздействием $\bar{Y}(t)$. В зависимости от наблюдаемого отклонения $\varepsilon(t)$ формируется соответствующее управляющее воздействие $\varepsilon_y(t)$ на ПТЭ, а через него и регулирующее $\mu_y(t)$ на объект, которое уменьшает это отклонение. Задача управления техническим состоянием РТС с контролем параметров была сформулирована как задача определения апостериорного закона распределения времени до первого выхода значения вектора определяющего параметра процесса $X(s)$ за пределы допусковой области S_0 относительно наблюдаемой реализации $x^j(t)$, т.е. как задача определения вероятности безотказной работы $P^*(s)$ изделия с номером j до момента $s > t_k$, если до момента t_k включительно его состояние определялось реализацией

$$P^*(s) = P\{X(s) \in S_0 / x^j(t)\}, \quad t_1^j \leq t \leq t_k^j, \quad s \geq t_k.$$

На рис. 1 первый контур схемы, отмеченный штриховыми линиями, функционирует при управлении техническим состоянием РТС по наработке. При управлении техническим состоянием РТС с контролем параметров используется второй контур, включающий БФА, который по измеряемым значениям выходных параметров объекта $Y(t)$ и показателей ПТЭ $Z(t)$ формирует оператор $V(Z, Y)$ или $V(Z, X)$, обеспечивающий изменение алгоритмов управления. На рис. 2 представлена модель управление техническим состоянием РТС с контролем уровня надежности, где объектом управления является сам объект эксплуатации и ПТЭ.

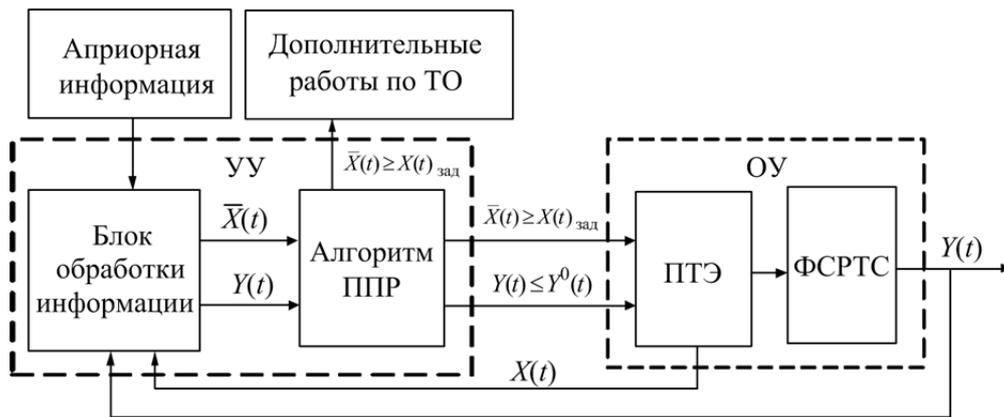


Рис. 2. Модель управление техническим состоянием РТС с контролем уровня надежности

На рис. 2 обозначено: ППР – прогнозирование объема и периодичности ПР.

В качестве регулируемой величины использовались периоды и объем ПР, при которых суммарные затраты $R(E)$ не превышают допустимой величины при заданной вероятности безотказной работы $P(E)$. Цель управления ТС состоит в обеспечении заданного уровня надежности, готовности и эффективности при минимальных затратах на их эксплуатацию. Система показателей эффективности управления ТС представим в виде

$$\mathcal{E}(t) = \{C_{\Sigma}(U, t), K_{\text{ти}}(U, t), W(U, t)\}, \quad (1)$$

где $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ – вектор параметров, обусловленный характеристиками системы ТО; $C_{\Sigma}(t)$ – суммарные затраты на ТО; $K_{\text{ти}}(t)$ – коэффициент технического использования; $W(t)$ – эффективность применения.

Одним из важных требований, предъявляемым к системе ТО, является ограниченность ресурсов, а именно, суммарных затрат, при неограниченном возрастании времени:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_{\Sigma}(U, t)}{t} < \infty. \quad (2)$$

Выполнение условия (2) обеспечивается выбором соответствующей стратегии и рациональной организации ТО. В качестве критерия оптимизации управления ТС примем минимум затрат

на ТО при условии выполнения целевых требований по повышению $K_{ТИ}$ и эффективности применения РТС. Поэтому оптимизация управления ТС возможна, в том числе и за счет определения оптимальной периодичности ТО $T_{ТО}$ при фиксированных остальных значениях параметров вектора U системы ТО.

Тогда задача определения оптимального периода ТО может быть записана в виде

$$C_{\Sigma}(T_{ТО}^*, t | U) = \min_{T_{ТО} \in U} \{C_{\Sigma}(T_{ТО}, t | U)\} \text{ при } \begin{cases} K_{ТИ}(T_{ТО}, t | U) \geq \hat{K}_{ТИ}; \\ W(T_{ТО}, t | U) \geq \hat{W}, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{ТО}^*$ – оптимальный период ТО; $\hat{K}_{ТИ}$ – заданное значение КТИ; \hat{W} – заданное значение эффективности применения РТС по назначению.

В работах [3, 4] рассмотрен подход к оптимизации периодичности ТО по критерию максимума $K_{ТИ}$, однако для учета не только временных, но и экономических характеристик системы ТО РТС следует использовать критерий, наиболее полно учитывающий условия (1) и (2). Поэтому в предлагаемом способе в качестве критерия оптимизации выбран минимум относительного непроизводительно расходуемого ресурса $R_{отн}^*(\tau_i)$ изделия за время τ_i , который позволяет учесть в том числе и суммарные затраты на ТО за время τ_i и определяется по выражению

$$R_{отн}^*(\tau_i) = \frac{C_0 \cdot \left[\tau_i - \int_0^{\tau_i} P_{пар}(t) dt \right] + C_{\phi} \cdot \int_0^{\tau_i} P_{пар}(t) dt + C_o \cdot \left[\tau_i - \int_0^{\tau_i} P_{пар}(t) dt \right] + C_k \tau_k + C_{п} \tau_{п} P_{пар}(\tau_i) + C_b \tau_b \cdot (1 - P_{пар}(\tau_i))}{C_k \tau_k + C_{п} \tau_{п} P_{пар}(\tau_i) + C_b \tau_b \cdot (1 - P_{пар}(\tau_i))} \quad (4)$$

В этом случае оптимальный период ТО определяется из выражения

$$T_{ТО}^* = \max \{ \tau_i : R_{отн}^*(\tau_i) \rightarrow \min \}, \quad (5)$$

где $R_{отн}^*(\tau_i)$ – затраты относительного непроизводительно расходуемого ресурса изделия за время τ_i ; τ_i – интервалы времени между предполагаемыми ТО изделия $\tau = t_n - t_{n-1}$; C_o – средний расход ресурса изделия в единицу времени при нахождении изделия в состоянии скрытого отказа; C_k – средний расход ресурса изделия в единицу времени при проведении контроля работоспособности изделия; τ_k – среднее время контроля работоспособности изделия; $C_{п}$ – средний расход ресурса изделия в единицу времени при проведении ТО; $\tau_{п}$ – среднее время проведения планового ТО; C_b – средний расход ресурса изделия в единицу времени при проведении аварийно-восстановительных работ; τ_b – среднее время проведения аварийно-восстановительных работ; C_{ϕ} – средний расход ресурса изделия в единицу времени при нахождении изделия в работоспособном состоянии; $P_{пар}(\tau_i)$ – параметрическая вероятность безотказной работы изделия за время τ_i .

Очевидно, что при решении задачи определения оптимального периода ТО при эксплуатации по состоянию основные затруднения вызывает необходимость определения вероятности безотказной работы РТС. При наличии нескольких независимых определяющих ТС параметров параметрическая вероятность безотказной работы изделия определяется по выражению

$$P_{пар}(\tau_i) = \prod_{r=1}^M P_r(\tau_i), \quad (6)$$

где M – количество определяющих предельное состояние параметров изделия; $P_r(\tau_i)$ – вероятность невыхода r -го определяющего параметра ТС за пределы допусков в течение прогнозируемого периода τ_i .

Так как на процесс изменения параметра во времени влияет множество различных независимых факторов, то вероятность безотказной работы (невыхода параметра за пределы допуска) изделия по r -му определяющему параметру за время $T = t_n - t_{n-1}$ определяется как

$$P_r(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r^2(T)}} \int_{v_r^{\text{н}}}^{v_r^{\text{в}}} \exp\left\{-\frac{[v_r - \bar{v}_r(T)]^2}{2\sigma_r^2(T)}\right\} dv_r, \quad (7)$$

где t_{n-1} – момент времени проведения последнего измерения определяющего параметра; $v_r^{\text{в}}$ и $v_r^{\text{н}}$ – верхняя и нижняя границы допуска r -го определяющего предельное состояние системы параметра; $\bar{v}_r(t)$ – наиболее адекватная модель r -го определяющего ТС параметра; $\sigma_r^2(t)$ – дисперсия r -го определяющего параметра.

Формирование математических моделей изменения определяющих параметров во времени осуществлялось на основе методов анализа и прогнозирования временных рядов (метод группового учета аргументов, сингулярный спектральный анализ и т.д.) в области полиномов вида

$$v(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i + \sum_{j=2}^n b_j t^{j-1}, \quad i, j \in Z, \quad n \leq n_{\text{max}}, \quad (8)$$

где a_i, b_j – неизвестные коэффициенты; Z – множество натуральных чисел; n_{max} – установленное значение максимальной степени полинома.

Расчет коэффициентов математических моделей производится на основе обучающей части исходных данных объемом k_o . В качестве критерия адекватности математических моделей изменения определяющих параметров выбрана относительная квадратическая погрешность временного тренда:

$$\Delta_m^2(v) = \frac{\sum_{j=1+k_o}^k (v_{jm} - \tilde{v}_j)^2}{\sum_{j=1+k_o}^k \tilde{v}_j^2}, \quad (9)$$

где \tilde{v}_j – измеренное значение определяющего параметра; v_{jm} – значение определяющего параметра в j -й момент времени, полученное с помощью m -й модели; k – объем исходных данных: $k = k_n + k_o$; k_n – объем проверочной части исходных данных.

Практическая реализация способа предложена на основе адаптивной системы управления техническим состоянием с настраиваемой моделью, представленной на рис. 3.

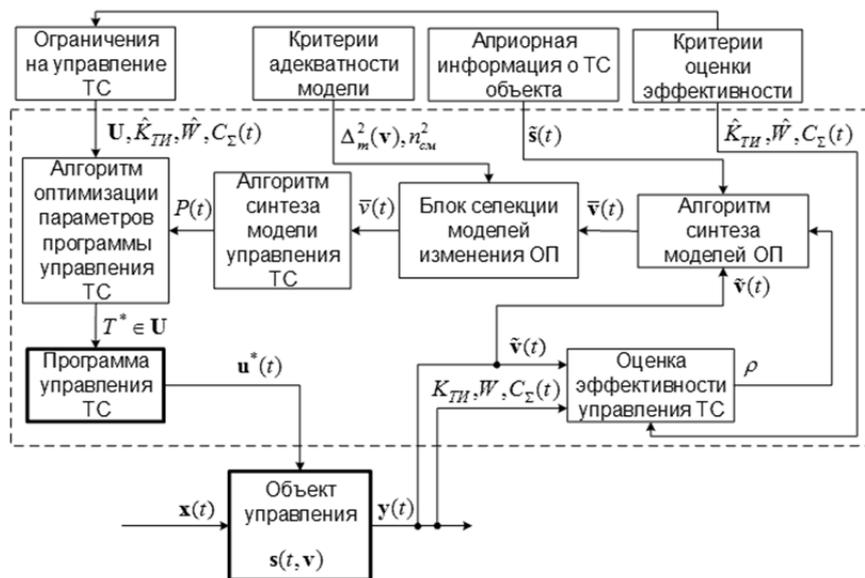


Рис. 3. Структура адаптивной системы управления техническим состоянием

Для оценки влияния эксплуатационно-технических характеристик изделий на эффективность эксплуатации РТС в работе модернизирован метод формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции РТС и устройство для его реализации [5]. Модернизированный метод формирования смешанной системы управления ТС заключается в ранжировании эксплуатационно-технических характеристик с учетом веса w_ψ и пошаговой процедуре выбора метода управления техническим состоянием РТС. Алгоритм выбора метода управления техническим состоянием РТС представлен на рис. 4 и состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Определение принадлежности методу управления ТС – Ω_l свойства $\gamma_{\psi,f}$ характеристики γ_ψ : $\Omega_{l,\psi,f} = \begin{cases} 0, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \notin \Omega_l; \\ 1, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \in \Omega_l. \end{cases}$

Шаг 2. Определение количества свойств F_ψ характеристики γ_ψ , принадлежащих методу управления ТС Ω_l с учетом w_ψ : $\Omega_{l,\psi} = w_\psi \sum_{f=1}^{F_\psi} \Omega_{l,\psi,f}$.

Шаг 3. Определение общего количества свойств всех характеристик, принадлежащих методу управления ТС Ω_l : $\Omega_l^0 = \sum_{\psi=1}^{\Psi} \Omega_{l,\psi}$.

Шаг 4. Вычисление относительного коэффициента Θ_l : $\Theta_l = \frac{\Omega_l^0}{\Xi}$, где $\Xi = \sum_{\psi=1}^{\Psi} F_\psi$.

Шаг 5. Алгоритм выбора наиболее эффективного метода управления техническим состоянием РТС представлен на рис. 4.

$$\Omega_{l_3} \Leftrightarrow l_3 = \arg \max_l \Theta_l.$$

Γ	w_ψ	$\gamma_{\psi,f}$	Ω_1	Ω_2	Ω_3
γ_1	0,32	γ_{11}	0	1	0
		γ_{12}	1	0	1
		γ_{13}	0	1	1
		3	0,32	0,64	0,64
γ_2	0,5	γ_{21}	1	0	1
		γ_{22}	0	1	1
		2	0,5	0,5	1
γ_3	0,18	γ_{31}	1	0	0
		γ_{32}	0	0	1
		γ_{33}	0	1	0
		3	0,18	0,18	0,18
Сумма	$\Sigma = 1$	8	$\Omega_1^0 = 1$	$\Omega_2^0 = 1,32$	$\Omega_3^0 = 1,82$
Максимум			$\Theta_1 = 0,125$	$\Theta_2 = 0,165$	$\Theta_3 = 0,227$
l_3					3

$$\Omega_{l,\psi,f} = \begin{cases} 0, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \notin \Omega_l; \\ 1, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \in \Omega_l; \end{cases}$$

$$\Omega_{l,\psi} = w_\psi \sum_{f=1}^{F_\psi} \Omega_{l,\psi,f}$$

$$\Omega_l^0 = \sum_{\psi=1}^{\Psi} \Omega_{l,\psi}$$

$$\Theta_l = \frac{\Omega_l^0}{\Xi}$$

$$l_3 = \max_l \Theta_l$$

$$\Xi = \sum_{\psi=1}^{\Psi} F_\psi$$

Рис. 4. Алгоритм выбора метода управления техническим состоянием РТС

Разработанный метод и устройство, его реализующее, позволяют учитывать свойства характеристик Γ по их уровням $\gamma_{\psi,f}$ и могут быть использованы для выбора периодичности и объема ПР с целью применения смешанной системы управления техническим состоянием РТС. С целью реализации предложенных моделей, алгоритма и метода управления техническим состоянием РТС разработана методика комплексного ТО. Отличительной особенностью методики является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания РТС, позволяющий для момента времени, кратному периоду ТО, определить объем ПР за счет применения выбранных ме-

тодов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. Разработанный алгоритм прогнозирования периодичности и объема выполнения ПР при применении метода управления ТС с контролем уровня надежности позволяет определить периодичность ТО элементов РТС $E^* \{ \tau_{i_s}^*, i=1, \dots, n \} \subset E$, при котором суммарные затраты $R(E)$ не превышают допустимой величины R_0 , и выполняются условия

$$P^*(E^*) = \max_E \min_t P(E, t),$$

где $t \in [0, T]$, $P(E, t)$ – вероятность безотказной работы РТС.

С помощью рекуррентного уравнения, полученного путем применения принципа оптимальности Беллмана, на каждом этапе вычислений определялась функция $\phi_i(R_i)$ – min суммарной интенсивности отказов при проведении ПР, решение о проведении которых были приняты на этапах 1, 2, ..., $i-1$ при заданном состоянии затрат R_i :

$$\phi_i(R_i) = \min_{x_i} \frac{1}{x_i} \left[a_i - \phi_{i-1} \left(\frac{R_i - (x_i - 1)r_i}{x_i} \right) \right]. \quad (10)$$

Разработанный алгоритм позволяет определить оптимальный период ТО РТС при применении метода управления ТС с контролем уровня надежности. Программный продукт зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ Роспатента по заявке 2006614190 от 08.12.06 [6].

Разработан алгоритм прогнозирования периодичности и объема выполнения ПР при применении метода управления ТС с контролем параметров [7]. Алгоритм включает следующие этапы: получение с помощью ЭВМ случайной величины с заданным законом распределения для моделирования исследуемого случайного процесса (СП) $Z(t)$ в целом; получение апостериорного СП $Z(y)$, $y \geq t_k$ на основе конкретной реализации $z_j(t)$, $t_1 \leq t \leq t_k$, процесса $Z(t)$.

Обоснован подход, основанный на представлении исследуемого СП $Z(t)$ в виде канонического разложения В. С. Пугачева

$$Z(t) = m(t) + \sum_v V_v \phi_v(t), \quad (11)$$

где $m(t)$ – математическое ожидание (МО) условного СП; $\phi_v(t)$ – неслучайные функции времени, называемые координатными; V_v – случайные коэффициенты, некоррелированные между собой ($M[V_v] = 0$, $M[V_v V_\mu] = 0$, $v \neq \mu$).

Для получения аналитического описания исследуемого СП и воспроизведения множества его реализаций проводились экспериментальные исследования с целью оценки и прогнозирования ТС РТС. На основе результатов исследований разработана комплексная методика ТОРСБН-4Н, структура которой представлена на рис. 5.

В ходе эксперимента проведены измерения прогнозирующих параметров РТС, входящих в состав РСБН-4Н, при проведении ежемесячного технического обслуживания ТО-1 с целью получения оценок вероятностных характеристик и прогнозирования ТС изделий. Проведены анализ результатов измерений прогнозирующих параметров при проведении ТО-1 и проверка о принадлежности их нормальному закону распределения случайных величин. Так, при степени свободы $r = 2$ гипотезу принять нельзя – ($\mu = 6,01$; $\sigma = 2,47$; $\chi^2 = 176,99$). С учетом этого на втором этапе привлекались дополнительные данные по измерениям, проведенным при осуществлении ежемесячного технического обслуживания. Повторная проверка проводилась с использованием критерия χ^2 и оцениванием коэффициентов асимметрии и эксцесса на основании результатов контроля 10 изделий, входящих в состав РСБН-4Н с разной наработкой. Результаты проверки подтвердили гипотезу о нормальности распределения результатов измерений. Для решения задачи прогнозирования ТС изделия на третьем этапе разработан алгоритм, позволяющий учитывать значения конкретной реализации и получать на этой основе реализацию апостериорного СП [8]. Предложенный подход может быть использован для решения других прикладных задач в теории надежности [9, 10].

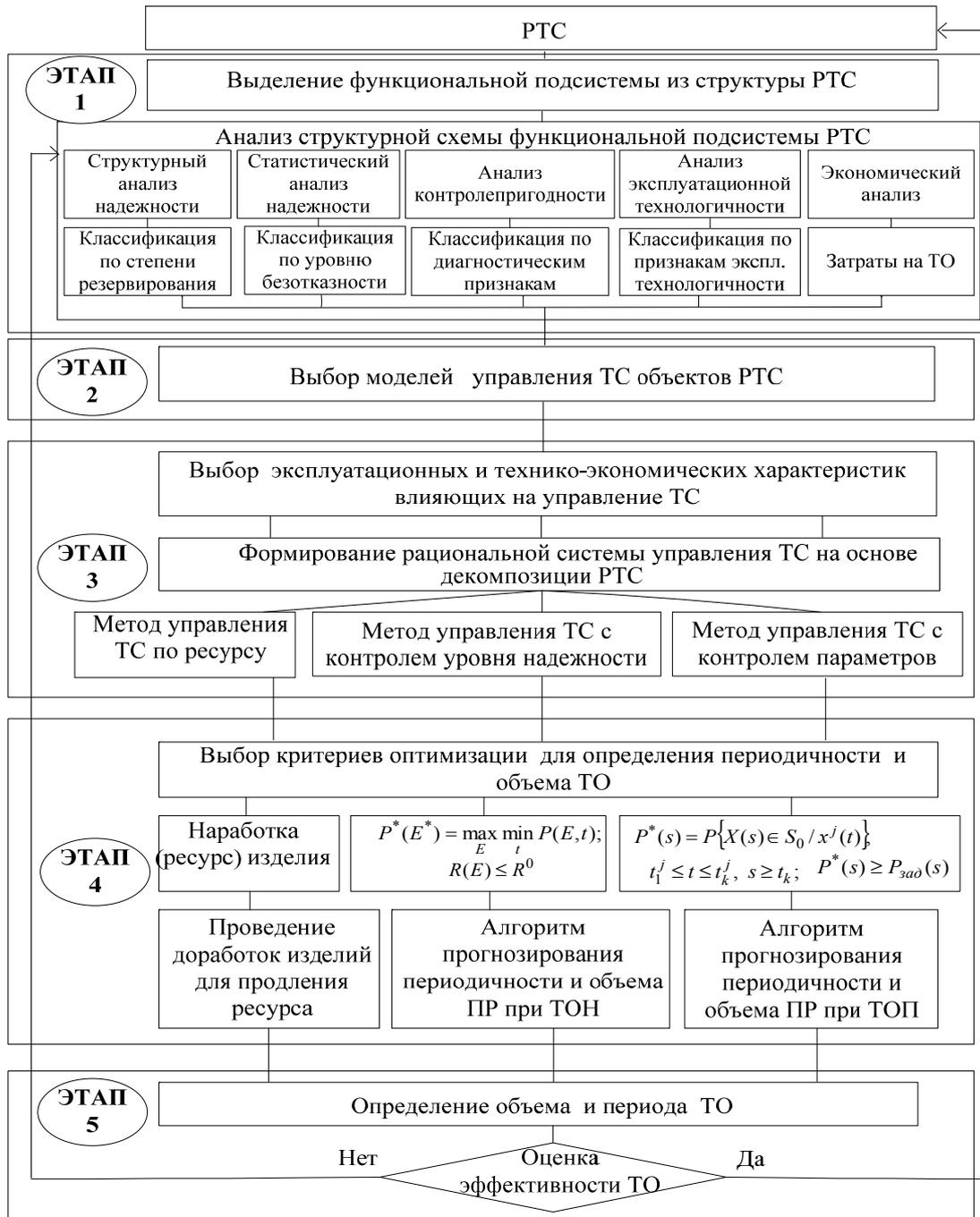


Рис. 5. Смешанная система управления техническим состоянием PTS

Выводы

Таким образом, разработана смешанная система управления техническим состоянием PTS, отличительной особенностью которой является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания PTS, позволяющий для момента времени, кратному периоду ТО, определить объем ПР на основе применения выбранных методов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. Основой построения методики служат взаимосвязь моделей управления техническим состоянием PTS, модернизированного метода формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции PTS, алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, апробация и оценка эффективности выполнения ТО.

Библиографический список

1. Лебедев, В. В. Модели технического обслуживания комплексов средств автоматизации : моногр. / В. В. Лебедев, Ю. Т. Зырянов. – Воронеж : Изд-во ВУНЦ ВВС ВВА, 2014. – 99 с.
2. Зырянов, Ю.Т. Планирование профилактики в организационно-технических системах / Ю. Т. Зырянов, К. А. Малыков // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 2. – С. 410–420.
3. Зырянов, Ю. Т. Планирование контроля технического состояния радиотехнических систем / Ю. Т. Зырянов, Д. Н. Ледовских // Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Казань : КГТУ им. А. Н. Туполева, 2008. – С. 326–329.
4. Зырянов, Ю. Т. Пути совершенствования технического обслуживания авиационных радиотехнических систем / Ю. Т. Зырянов, К. А. Малыков, Д. Н. Ледовских // Вестник Тамбовского ВВАИУРЭ (ВИ). – 2008. – № 3. – С. 32–40.
5. Пат. 2305640 Российская Федерация, МКИ⁷B60S5/00, G01M17/00. Устройство для оценки влияния функционального состояния конструктивных узлов на безопасность эксплуатации технических средств / Лебедев В. В.; заявитель и патентообладатель Тамбовский ВАИИ. – № 2305640; заявл. 23.06.05; опубл. 10.09.07, Бюл. № 25. – 6 с.
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2007610585 Российская Федерация. Оптимизация периодичности и объема профилактических работ при планировании и организации технического обслуживания комплексов («ОПОПР – ПОТОК») / В. В. Лебедев, А. Н. Потапов ; заявитель и правообладатель В. В. Лебедев. – № 2006614190; заявл. 08. 12.06; зарег. в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 06.02.07.
7. Лебедев, В. В. Оптимизация методов технического обслуживания радиотехнических систем / В. В. Лебедев, С. Н. Моисеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 14. – С. 178–181.
8. Лебедев, В. В. Алгоритм периодичности планирования и организации технического обслуживания комплексов средств автоматизации / В. В. Лебедев, А. Н. Потапов // Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Радиофизика и радиотехника. – 2007. – № 112 (3). – С. 49–51.
9. Назаров, Д. А. Алгоритм построения гиперпараллелепипедов, вписанных в область работоспособности аналоговых технических систем / Д. А. Назаров, А. В. Саушев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 88–90.
10. Юрков, Н. К. Формирование моделирующей среды авиационного тренажера // Н. К. Юрков, Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 9–16.

Зырянов Юрий Трифонович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования радиоэлектронных
и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный технический
университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: zut-tmb@mail.ru

Лебедев Вадим Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра специального вооружения,
ВУНЦ ВВС «ВВА» имени проф. Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина
(394064, Россия, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, 54 А)
E-mail: wwl68@mail.ru

Ледовских Дмитрий Николаевич

старший помощник начальника организации
подготовки научно-педагогических кадров,
ВУНЦ ВВС «ВВА» имени проф. Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина
(394064, Россия, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, 54 А)
E-mail: Dmitry_ledovskikh@mail.ru

Zyryanov Yuri Trifonovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of designing radio-electronic
and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(392000, 106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Lebedev Vadim Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of special weapons,
VUNTS VVS "VVA"
named after prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin
(394064, 54 A Starykh Bol'shevikov street,
Voronezh, Russia)

Ledovskikh Dmitri Nikolaevich

senior assistant chief of training scientific-pedagogical
personnel,
VUNTS VVS "VVA"
named after prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin
(394064, 54 A Starykh Bol'shevikov street,
Voronezh, Russia)

Рязанов Илья Георгиевич

аспирант,
Тамбовский государственный технический
университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: chief.ryazanoff2012@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность.* Существующая организация планирования и управления ТС РТС имеет ряд недостатков: многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на РТС приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации объекты имеют различное фактическое состояние, в связи с чем наработка или календарный срок службы не характеризуют однозначно ТС объекта в процессе эксплуатации; техническое обслуживание при эксплуатации РТС проводится с обязательным совмещением по месту и времени установленных видов ТО одинаковых по наименованию и периодичности, на всех составных частях техники, не учитывая их эксплуатационно-технические характеристики; низкая ремонтпригодность техники, приводящая к значительным затратам на ТО за период эксплуатации; необходимость поддержания показателей боевой готовности РТС на заданном уровне в условиях сокращения материальных, временных и трудовых затрат на ТО. *Цель.* Основная цель работы – разработать смешанную систему управления техническим состоянием (ТС) радиотехнических средств (РТС), отличительной особенностью которой является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания (ТО) РТС, позволяющий определить объем профилактических работ (ПР) на основе применения выбранных методов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. *Методы решения.* Математические расчеты проведены с использованием методов теории вероятностей и математической статистики, методов интегрального и дифференциального исчисления, метода анализа иерархий, метода группового учета аргументов, сингулярного спектрального анализа, принципа оптимальности Беллмана. *Результаты.* Обоснован подход, основанный на представлении исследуемого СП $Z(t)$ в виде канонического разложения В. С. Пугачева. Для получения аналитического описания исследуемого СП и воспроизведения множества его реализаций проводились экспериментальные исследования с целью оценки и прогнозирования ТС РТС. На основе результатов исследований разработана комплексная методика ТО РСБН-4Н. В ходе эксперимента проведены измерения прогнозирующих параметров РТС, входящих в состав РСБН-4Н, при проведении ежемесячного технического обслуживания ТО-1 с целью получения оценок вероятностных характеристик и прогнозирования ТС изделий. Проведены анализ результатов измерений прогнозирующих параметров при прове-

Ryazanov Ilya Georgievich

postgraduate student,
Tambov State Technical University
(392000, 106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Abstract. *Background.* The existing organization of the planning and management of TC RTS has a number of disadvantages: the diversity and the stochastic nature of the impact of operational factors on the RTS lead to the fact that at the same time or the duration of the operation objects have different actual state, in this connection, the operating time or calendar life does not characterize uniquely the TS of the object during operation; maintenance in the operation of RTS is carried out with the obligatory combination of the time and place of the established types of THE same name and frequency, all the composite parts of the equipment without taking into account their operational and technical characteristics; low maintainability of equipment, leading to significant costs for the period of exploitation; the need to maintain the indicators of combat readiness of the RTS at a given level in terms of reducing material, time and labour costs. *Goal.* Main goal: to develop a mixed system of control of technical condition (TC) radio equipment (RTS), the distinctive feature of which is a comprehensive approach to solving the problem of technical maintenance (THAT) of the RTS to determine the scope of preventive maintenance (OL) through the application of selected methods of management of the vehicle and algorithms to predict the frequency and scope of PR in which the expense is minimal and the probability of failure is not lower than required. *Methods of solution.* Mathematical calculations are carried out using methods of probability theory and mathematical statistics, methods of integral and differential calculus, the analytic hierarchy process, method of group account of arguments, singular spectrum analysis, principle of optimality of Bellman. *Results.* It justifies the approach based on representation of the studied SP $Z(t)$ in the form of canonical decomposition V. S. Pugachev. To obtain an analytical description of the investigated SP and reproduction of many of his implementations were carried out experimental investigations to assess and predict TC RTS. Based on the results of the research developed a comprehensive methodology THE RSBN-4N. The experiment measured the prediction parameters of the RTS, members of the RSBN-4N, when performing monthly maintenance, IT-1, with the purpose of obtaining estimations of probability characteristics and prediction of TC products. The analysis of the measurement results of the prediction parameters during TM-1 and check on the backgrounds of their normal law of distribution of random variables. So, when the degrees of freedom $r=2$ hypothesis can not be accepted – (; $\chi^2=176,99$). With this in mind, the second stage involved additional data on measurements carried out in conducting monthly maintenance. The re-inspection was performed using the χ^2 criterion and by evaluation of skewness and kurtosis

дении ТО-1 и проверка о принадлежности их нормальному закону распределения случайных величин. Так, при степени свободы $r = 2$ гипотезу принять нельзя – ($\mu = 6,01$; $\sigma = 2,47$; $\chi^2 = 176,99$).

С учетом этого на втором этапе привлекались дополнительные данные по измерениям, проведенным при проведении ежемесячного технического обслуживания. Повторная проверка проводилась с использованием критерия χ^2 и оцениванием коэффициентов асимметрии и эксцесса на основании результатов контроля 10 изделий, входящих в состав РСБН-4Н с разной наработкой. Результаты проверки подтвердили гипотезу о нормальности распределения результатов измерений. Для решения задачи прогнозирования ТС изделия на третьем этапе разработан алгоритм, позволяющий учитывать значения конкретной реализации и получать на этой основе реализацию апостериорного СП. *Выводы.* Разработана смешанная система управления техническим состоянием РТС, отличительной особенностью которой является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания РТС, позволяющий для момента времени, кратного периоду ТО, определить объем ПР на основе применения выбранных методов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. Основой построения методики служат взаимосвязь моделей управления техническим состоянием РТС, модернизированного метода формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции РТС, алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, апробация и оценка эффективности выполнения ТО.

Ключевые слова: смешанная система ТС РТС, оптимальный период ТО, эксплуатационно-технические характеристики.

based on the results of the 10 products included in the RSBN-4N with different operating time. The test results confirmed the hypothesis of normality of the distribution of measurement results. To solve the problem of predicting the TC of the product in the third stage of the algorithm, allowing to consider values of a particular implementation and to obtain on this basis the implementation of the a posteriori SP. Conclusions. Developed a mixed system of the technical state of RTS, the distinctive feature of which is a comprehensive approach to solving the problem of maintenance of RTS that allows for point-in-time multiple of the period, to define the scope of PR through the application of selected methods of management of the vehicle and algorithms to predict the frequency and scope of PR in which the expense is minimal and the probability of failure is not lower than required. The basis of constructing methods are the relationship between management models of the technical state of RTS, the modernized method of forming a mixed system of management of the vehicle based on the decomposition of RTS, algorithms to predict the frequency and scope of PR, test, and evaluate.

Key words: combined system TS RTS, the optimal period of THE performance parameters.

УДК 519.2

Зырянов, Ю. Т.

Об одном подходе к формированию смешанной системы управления техническим состоянием радиотехнических средств / Ю. Т. Зырянов, В. В. Лебедев, Д. Н. Ледовских, И. Г. Рязанов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 49–59. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-8.