

А.Н. Дьяков
Д.В. Решетников, кандидат технических наук
С.Н. Бояршинов, кандидат технических наук

Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем

Эксплуатация современного вооружения сложный и дорогостоящий процесс. Как показывает практика, для ряда вооружений существует возможность снижения затрат без ущерба его результативности. С целью снижения затрат целесообразно проводить моделирование эксплуатационных процессов на весь срок эксплуатации. В статье предлагается модель системы поддержания готовности к применению вооружения, которая позволяет определить показатель результативности и сопоставить его с величиной эксплуатационных затрат. Данная модель может быть применена для определения затрат как эксплуатируемого вооружения, так и проектируемого вооружения на этапе создания его системы эксплуатации. Оптимизация данной модели любым известным методом позволит определить значения эксплуатационных и стоимостных параметров, которые позволят оптимизировать эксплуатационные затраты. Также модель может быть применена при реализации концепции управления полной стоимостью жизненного цикла вооружения.

Введение

Приобретая сложную техническую систему (СТС), заказчик должен учитывать объемы последующих эксплуатационных затрат. Обоснование требований к системам поддержания работоспособного состояния СТС должны основываться на прогнозировании эксплуатационных процессов с учетом величины соответствующих затрат. Для прогнозирования технических характеристик оборудования известно большое количество методик, позволяющих оценить как результативность самой сложной технической системы, так и эффективность ее системы эксплуатации [1]. Для прогнозирования экономических показателей также известны различные подходы, например представленные в [2].

Однако не так велико разнообразие методик, позволяющих оценивать показатели эффективности СТС и их систем эксплуатации в сравнении с величиной эксплуатационных затрат. Предлагаемый в данной статье подход позволяет оценить показатель результативности системы эксплуатации СТС и прогнозировать величину эксплуатационных затрат на основе моделирования полумарковских процессов [3]. Предлагаемая модель отличается от известных тем, что она позволяет учитывать влияние не только отказов оборудования и мероприятий по их устранению, но также и мероприятий технического обслуживания, метрологического обеспечения эксплуатации, и мероприятий по техническому освидетельствованию (диагностированию) составных частей сложной технической системы.

На современном этапе развития технологий производства и эксплуатации вооружений, большая часть которых является сложными техническими комплексами, возрастает значимость величины затрат при их эксплуатации. Как показывает практика, эксплуатационные затраты вносят значительный вклад в стоимость полного жизненного цикла вооружения. С целью повы-

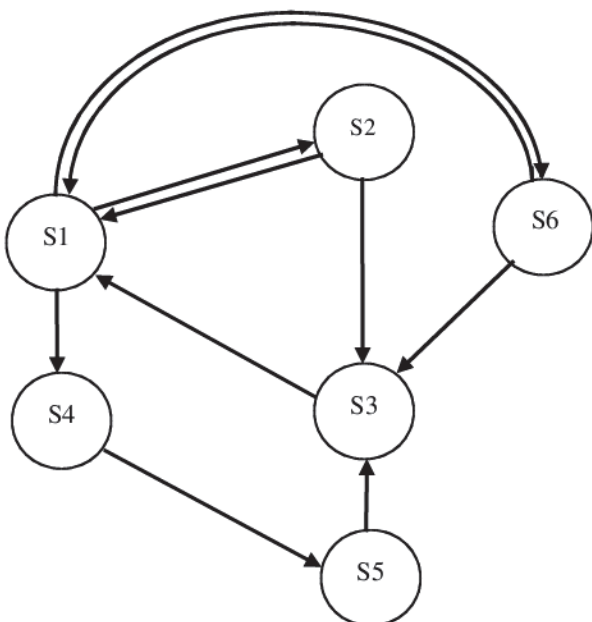
шения эффективности вооружения необходимо снижать, в том числе и величину эксплуатационных затрат. Однако снижение затрат возможно в пределах, позволяющих обеспечить требуемый уровень результативности вооружения, для чего необходимо проводить моделирование эксплуатационных процессов, которое позволит обосновать эксплуатационно-технические показатели [4].

Одним из известных способов моделирования эксплуатационных процессов является получение аналитических зависимостей на основе полумарковских моделей. Данный подход позволяет получить аналитические зависимости показателей результативности вооружения и его стоимостных характеристик от эксплуатационных параметров. В качестве стоимостных характеристик могут выступать стоимость жизненного цикла оборудования и величина эксплуатационных затрат. В подобных моделях показателями результативности, как правило, являются комплексные показатели надежности, такие как коэффициент готовности, коэффициент технического использования или коэффициент оперативной готовности [3].

Предлагаемая в данной статье модель системы поддержания готовности вооружения отличается от известных тем, что позволяет учитывать не только мероприятия технического обслуживания (ТО) и ремонта, но и метрологическое обслуживание средств измерения и мероприятия технического освидетельствования (диагностирования) объектов государственного технического надзора (МОТД). Учет подобных эксплуатационных мероприятий крайне важен, так как в отдельных образцах вооружений имеется большое количество средств измерений, сосудов и емкостей, работающих под давлением. Временные затраты на проведение данных мероприятий оказывают существенное влияние на коэффициент готовности вооружения, а затраты на их проведение сопоставимы с затратами на плановое техническое обслуживание.

Модель системы эксплуатации СТС

Модель системы эксплуатации СТС описывается графом, представленным на рисунке 1.



S1 – состояние работоспособности, вооружение готово к применению по назначению;

S2 – проводится проверка образца вооружения на функционирование, перед применением либо в период технического обслуживания (ТО);

S3 – вооружение находится в неработоспособном состоянии, проводятся ремонтно-восстановительные работы;

S4 – состояние скрытого отказа, вооружение переходит в неработоспособное состояние в момент времени, неизвестный обслуживающему персоналу, и пребывает в нем до момента времени начала применения либо начала ТО;

S5 – проверка на функционирование перед применением либо при проведении ТО, после того как образец вооружения в течение неизвестного времени находится в неисправном состоянии (в состоянии скрытого отказа);

S6 – проведение планового метрологического обслуживания, мероприятий по техническому освидетельствованию (диагностированию).

Рисунок 1 – Граф состояний системы эксплуатации СТС

СТС может находиться одновременно только в одном состоянии $i=1,2,3,\dots,n$ из множества возможных ($i \in E$). В начальный момент времени $t=0$ СТС находится в одном из состояний $i \in E$ и проводит в нем случайное время τ_i , распределенное по какому-либо закону; в момент времени $t=\tau_i$ элемент мгновенно переходит в новое состояние $j \in E$ с вероятностью $p_{ij} \geq 0$, причем $\sum_{j \in E} p_{ij} \leq 1$ для любого $i \in E$. В состоянии j элемент пребывает случайное время τ_j , распределенное по какому-либо закону, и затем переходит в очередное состояние и т. д. Определим матрицу $Q = \{Q_{ij}(t)\}$ независимых функций распределения времени в i -м состоянии до перехода в j -е состояние, при условии, что данный переход был бы единственно возможным.

Проверка на функционирование образца вооружения проводится перед применением либо в период ТО:

$$Q_{12}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_1, \\ 1 & \text{при } t \in [\tau_1; \tau_3). \end{cases} \quad (1)$$

Переход из работоспособного состояния S1 в состояние S6 (МОТД), при котором осуществляется метрологическое обслуживание составных частей, проведение мероприятий технического освидетельствования, технического диагностирования описывается функцией распределения:

$$Q_{16}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_3, \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_3. \end{cases} \quad (2)$$

Переход из состояния проверки на функционирование в исходное работоспособное состояние происходит через неслучайное время τ_2 :

$$Q_{21}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_2, \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_2. \end{cases} \quad (3)$$

Переход из состояния S6 (метрологического обслуживания и ТД) в работоспособное состояние S1 возможен по истечении длительности выполнения операций МОТД – τ_6 и описывается:

$$Q_{61}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_6, \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_6. \end{cases} \quad (4)$$

Опишем закон перехода системы из работоспособного состояния S1 в состояние скрытого отказа S4 – $Q_{14}(t)$. Как известно, отказы оборудования могут существенно различаться как по периодичности возникновения, так и по значимости последствий. Для того чтобы учесть в составе модели многообразие возможных отказов используем гиперэкспоненциальное распределение с интенсивностями отказов λ_i . Плотность вероятности гиперэкспоненциального распределения имеет вид:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}, \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^n c_i = 1$ образует смесь n экспоненциальных распределений.

Переход СТС из работоспособного состояния S1 в состояние скрытого отказа S4 описывается зависимостью:

$$Q_{14}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \int_0^t \sum_{i=1}^n c_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} & \text{при } t \in [0; \infty). \end{cases} \quad (6)$$

где c_i – вероятностная мера отказа i -й составной части,

λ_i – интенсивность отказа i -й составной части, $i = \overline{1, n}$ из множества M ($i \in M$) составных частей имеющих различные вероятности и интенсивности отказов.

Для упрощения расчетов примем: наиболее вероятен отказ двух составных частей агрегата имеющих соответственно интенсивности отказов λ_1 и λ_2 , $n=2$, проинтегрируем (6) и представим $Q_{14}(t)$ в виде:

$$\begin{aligned} Q_{14}(t) &= \int_0^t (c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) dt; \\ Q_{14}(t) &= c_1 \lambda_1 \left(\frac{-1}{\lambda_1} \right) e^{-\lambda_1 t} \Big|_0^t + c_2 \lambda_2 \left(\frac{-1}{\lambda_2} \right) e^{-\lambda_2 t} \Big|_0^t; \\ Q_{14}(t) &= c_1 + c_2 - c_1 e^{-\lambda_1 t} - c_2 e^{-\lambda_2 t}. \end{aligned} \quad (7)$$

При обнаружении отказа переход из состояния проверки на функционирование S2 в состояние ремонта S3 описывается при помощи экспоненциального закона распределения [6]:

$$Q_{23}(t) = 1 - e^{-\omega_2 t}, \quad (8)$$

где ω_2 – параметр потока отказов при проверке функционирования.

При обнаружении отказа в ходе проведения метрологического обслуживания либо мероприятий технического освидетельствования (диагностирования) СТС также переходит в неисправное состояние S3 но переход описывается зависимостью:

$$Q_{63}(t) = 1 - e^{-\omega_6 t}, \quad (9)$$

где ω_6 – параметр потока отказов при проведении мероприятий МОТД.

Завершение мероприятий МОТД и переход из S6 в S1 возможен по истечении длительности выполнения операций τ_6 и описывается функцией:

$$Q_{61}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_6; \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_6. \end{cases} \quad (10)$$

Переход из S1 в S4 на данном этапе описать затруднительно, поэтому сначала опишем переход из состояния скрытого отказа S4 в состояние ремонта S3 через неслучайное время τ_2 :

$$Q_{53}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_2; \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_2. \end{cases} \quad (11)$$

Для описания ремонта и последующего перехода в работоспособное состояние используем Гама-распределение, с целочисленным параметром $\alpha=2$ и используем частный случай – распределение Эрланга второго порядка [5]:

$$f(t) = \sum_{i=0}^{\alpha-1} \frac{t^i}{i! \beta^i} e^{-\frac{t}{\beta}}. \quad (12)$$

Переход из состояния ремонта S3 в состояние S1 описывается формулой:

$$Q_{31}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\beta}} - \frac{t e^{-\frac{t}{\beta}}}{1! \beta^1}. \quad (13)$$

По функциям изменения состояний во времени $Q_{ij}(t)$ найдем вероятности переходов

между данными состояниями [3]:

$$P_{ij}(\infty) = p_{ij} = \int_0^{\infty} \prod_{k \neq j} (1 - Q_{ik}(\tau)) dQ_{ij}(\tau). \tag{14}$$

Полученные условные вероятности переходов между состояниями представлены в таблицах 1 и 2. Найдем функцию распределения времени пребывания СТС в состоянии скрытого отказа S4. Так как из S1 система переходит в S4 в случайный момент времени, то и начало перехода из состояния S4 в состояние S2 тоже величина случайная. Время начала проверки на функционирование при скрытом отказе такое же, как и при переходе S1-S2 и равно τ_1 . Через условную функцию распределения $F_{14}(t)$ вычислим условное математическое ожидание длительности перехода \bar{t}_{14} :

$$\bar{t}_4 = \tau_1 - \bar{t}_{14}. \tag{15}$$

Таблица 1 – Аналитические зависимости модели

№	$Q_{ij}(t)$	p_{ij}
1-2	$Q_{12}(t) = \begin{cases} 0 & \text{npu } t < \tau_1; \\ 1 & \text{npu } t \in [\tau_1; \tau_3]; \end{cases}$	$p_{12} = c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} - c_1 e^{-\lambda_1 \tau_3} + c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1} - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_3}$
1-4	$Q_{14}(t) = c_1 + c_2 - c_1 e^{-\lambda_1 t} - c_2 e^{-\lambda_2 t}$	$p_{14} = c_1 - c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} + c_2 - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}$
1-6	$Q_{16}(t) = \begin{cases} 0 & \text{npu } t < \tau_3; \\ 1 & \text{npu } t \geq \tau_3; \end{cases}$	$p_{16} = c_1 e^{-\lambda_1 \tau_3} + c_2 e^{-\lambda_2 \tau_3}$
2-1	$Q_{21}(t) = \begin{cases} 0 & \text{npu } t < \tau_2; \\ 1 & \text{npu } t \geq \tau_2; \end{cases}$	$p_{21} = e^{-\omega_2 \tau_2}$
2-3	$Q_{23}(t) = 1 - e^{-\omega_2 t}$	$p_{23} = 1 - e^{-\omega_2 \tau_2}$
3-1	$Q_{31(2)}(t) = 1 - (1 + \omega_1 t) e^{-\omega_1 t}$	$p_{31} = 1$
4-5		$p_{45} = 1$
5-3	$Q_{53}(t) = \begin{cases} 0 & \text{npu } t < \tau_2; \\ 1 & \text{npu } t \geq \tau_2; \end{cases}$	$p_{53} = 1$
6-1	$Q_{61}(t) = \begin{cases} 0 & \text{npu } t < \tau_6; \\ 1 & \text{npu } t \geq \tau_6; \end{cases}$	$p_{61} = e^{-\omega_6 \tau_6}$
6-3	$Q_{63}(t) = 1 - e^{-\omega_6 t}$	$p_{63} = 1 - e^{-\omega_6 \tau_6}$

Используя $P_{ij}(t) = F_{ij}(t) p_{ij}$, получим:

$$F_{14}(t) = \frac{P_{14}(t)}{p_{14}} = \frac{P_{14}(t)}{c_1 - c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} + c_2 - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}}. \tag{16}$$

На основании выражения $P_{ij}(t) = \int_0^t \prod_{k \neq j} [1 - Q_{ik}(\tau)] dQ_{ij}(\tau)$ вычислим P_{14} :

$$P_{14}(t) = \int_0^t [1 - Q_{12}(t)] [1 - Q_{16}] dQ_{14}(\tau);$$

$$P_{14}(t) = \begin{cases} c_1 - c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 - c_2 e^{-\lambda_2 t}, & \text{при } t \in [0; \tau_1); \\ 0, & \text{при } t \geq \tau_1. \end{cases} \tag{17}$$

Подставим (17) в (16) и найдем $F_{14}(t)$:

$$F_{14}(t) = \frac{c_1(1 - e^{-\lambda_1 t}) + c_2(1 - e^{-\lambda_2 t})}{c_1(1 - e^{-\lambda_1 \tau_1}) + c_2(1 - e^{-\lambda_2 \tau_1})}. \tag{18}$$

Таблица 2 – Аналитические зависимости модели

№	$F_i(t)$	\bar{t}_i
1-2	$F_1(t) = \begin{cases} c_1 - c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 - c_2 e^{-\lambda_2 t} & \text{при } t \in [0; \tau_1); \\ 1 & \text{при } t \notin [0; \tau_1); \end{cases}$	$\bar{t}_1 = \frac{c_1}{\lambda_1} - \frac{c_1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 \tau_1} + \frac{c_2}{\lambda_2} - \frac{c_2}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 \tau_1}$
1-4		
1-6		
2-1	$F_2(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\omega_2 t} & \text{при } t < \tau_2; \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_2; \end{cases}$	$\bar{t}_2 = \frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_2} e^{-\omega_2 \tau_2}$
2-3		
3-1	$F_3(t) = 1 - e^{-\omega_1 t} (1 + \omega_1 t)$	$\bar{t}_3 = \frac{2}{\omega_1}$
5-3	$F_5(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_2; \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_2; \end{cases}$	$\bar{t}_5 = \tau_2$
6-1	$F_6(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\omega_6 t} & \text{при } t < \tau_6; \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_6; \end{cases}$	$\bar{t}_6 = \frac{1}{\omega_6} - \frac{1}{\omega_6} e^{-\omega_6 \tau_6}$
6-3		
4-5		$\bar{t}_4 = \tau_1 - \frac{((-c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}) \tau_1 - \frac{c_1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 \tau_1} - \frac{c_2}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 \tau_1} + \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_1}{\lambda_2})}{c_1 - c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} + c_2 - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}}$

По известной функции распределения на интервале $[0; \infty)$ случайной величины времени t найдем ее математическое ожидание:

$$\bar{t}_{14} = \int_0^{\tau_1} [1 - F_{14}(t)] dt; \tag{19}$$

Проинтегрировав выражение, получим функцию:

$$\bar{t}_{14} = \frac{\left((-c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}) \tau_1 + \left(-c_1 \frac{1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 \tau_1} - c_2 \frac{1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 \tau_1} \right) - \left(-c_1 \frac{1}{\lambda_1} - c_2 \frac{1}{\lambda_2} \right) \right)}{c_1 - c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} + c_2 - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}}. \tag{20}$$

С учетом того, что $\bar{t}_4 = \tau_1 - \bar{t}_{14}$ безусловное математическое ожидание времени пребывания в состоянии скрытого отказа S4:

$$\bar{t}_4 = \tau_1 - \frac{\left((-c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}) \tau_1 + \left(-c_1 \frac{1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 \tau_1} - c_2 \frac{1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 \tau_1} \right) - \left(-c_1 \frac{1}{\lambda_1} - c_2 \frac{1}{\lambda_2} \right) \right)}{c_1 - c_1 e^{-\lambda_1 \tau_1} + c_2 - c_2 e^{-\lambda_2 \tau_1}}. \tag{21}$$

Для расчета безусловных математических ожиданий $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_3, \bar{t}_5, \bar{t}_6$ найдем безусловные функции распределения: $F_i(t) = 1 - \prod_{j \in E} [1 - Q_{ij}(t)]$.

Полученные функции также представлены в таблицах 1 и 2. Интегрируя функции распределения $F_i(t)$, получим математические ожидания времени нахождения СТС в конкретных состояниях S1-S6:

$$\bar{t}_i = \int_0^{\infty} [1 - F_i(t)] dt. \tag{22}$$

Составим уравнения для определения стационарных вероятностей состояний вложенной Марковской цепи [3]:

$$\begin{cases} \pi_1 = \rho_{21} \pi_2 + \rho_{31} \pi_3 + \rho_{61} \pi_6, \\ \pi_2 = \rho_{12} \pi_1, \\ \pi_3 = \rho_{23} \pi_2 + \rho_{53} \pi_5 + \rho_{63} \pi_6, \\ \pi_4 = \rho_{14} \pi_1, \\ \pi_5 = \rho_{45} \pi_4, \\ \pi_6 = \rho_{16} \pi_1. \end{cases} \tag{23}$$

Решив систему с учетом нормирующего уравнения $\sum \pi_i = 1$, получили решения:

$$\pi_1 = \frac{1}{1 + \rho_{12} + \rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{12} + \rho_{63} \rho_{16} + \rho_{14} + \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{16}}, \tag{24}$$

$$\pi_2 = \frac{\rho_{12}}{1 + \rho_{12} + \rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{12} + \rho_{63} \rho_{16} + \rho_{14} + \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{16}}, \tag{25}$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_{23} \rho_{12} + \rho_{63} \rho_{16} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{14}}{1 + \rho_{12} + \rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{12} + \rho_{63} \rho_{16} + \rho_{14} + \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{16}}, \tag{26}$$

$$\pi_4 = \frac{\rho_{14}}{1 + \rho_{12} + \rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{12} + \rho_{63} \rho_{16} + \rho_{14} + \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{16}}, \tag{27}$$

$$\pi_5 = \frac{\rho_{14} \rho_{45}}{1 + \rho_{12} + \rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{12} + \rho_{63} \rho_{16} + \rho_{14} + \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{16}}, \tag{28}$$

$$\pi_6 = \frac{\rho_{16}}{1 + \rho_{12} + \rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{12} + \rho_{63} \rho_{16} + \rho_{14} + \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{16}}. \tag{29}$$

Математическое ожидание полного перехода составит величину: $\bar{t} = \sum_{i=1}^n \pi_i \bar{t}_i$.

$$\bar{t} = \pi_1 (\bar{t}_1 + \rho_{12} \bar{t}_2 + (\rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{63} \rho_{16}) \bar{t}_3 + \rho_{14} \bar{t}_4 + \rho_{45} \rho_{14} \bar{t}_5 + \rho_{16} \bar{t}_6). \tag{30}$$

Пусть $\bar{t} = \pi_1 A$, где $A = \bar{t}_1 + \rho_{12} \bar{t}_2 + (\rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{63} \rho_{16}) \bar{t}_3 + \rho_{14} \bar{t}_4 + \rho_{45} \rho_{14} \bar{t}_5 + \rho_{16} \bar{t}_6$. С учетом $P_i = \frac{\pi_i \bar{t}_i}{\bar{t}}$, определим вероятности исследуемых процессов:

$$P_1 = \frac{\pi_1 \bar{t}_1}{\bar{t}} = \frac{\pi_1 \bar{t}_1}{\pi_1 A} = \frac{\bar{t}_1}{A}, \tag{31}$$

$$P_2 = \frac{\pi_2 \bar{t}_2}{\bar{t}} = \frac{\pi_2 \bar{t}_2}{\pi_1 A} = \frac{\rho_{12} \bar{t}_2}{\pi_1 A}, \tag{32}$$

$$P_3 = \frac{\pi_3 \bar{t}_3}{\bar{t}} = \frac{\pi_3 \bar{t}_3}{\pi_1 A} = \frac{(\rho_{23} \rho_{12} + \rho_{53} \rho_{45} \rho_{14} + \rho_{63} \rho_{16}) \bar{t}_3}{\pi_1 A}, \tag{33}$$

$$P_4 = \frac{\pi_4 \bar{t}_4}{\bar{t}} = \frac{\pi_4 \bar{t}_4}{\pi_1 A} = \frac{\rho_{14} \bar{t}_4}{\pi_1 A}, \tag{34}$$

$$P_5 = \frac{\pi_5 \bar{t}_5}{\bar{t}} = \frac{\pi_5 \bar{t}_5}{\pi_1 A} = \frac{\rho_{45} \rho_{14} \bar{t}_5}{\pi_1 A}, \tag{35}$$

$$P_6 = \frac{\pi_6 \bar{t}_6}{\bar{t}} = \frac{\pi_6 \bar{t}_6}{\pi_1 A} = \frac{p_{16} \bar{t}_6}{A}. \quad (36)$$

Полученные зависимости позволяют определить вероятностные и временные характеристики системы поддержания готовности вооружения. Вероятность нахождения в работоспособном состоянии S_1 , в данном случае является коэффициентом готовности, может быть использована в качестве показателя результативности системы поддержания готовности вооружения:

$$P_1 = K_r = f(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_6, \lambda_1, \omega_1, \omega_2, \omega_6). \quad (37)$$

Полученная аналитическая зависимость коэффициента готовности СТС является функцией эксплуатационных параметров:

- τ_1 – периодичность проведения ТО или подготовки вооружения к применению;
- τ_2 – длительность проведения проверки на функционирование в ходе ТО;
- τ_3 – периодичность проведения мероприятий МОТД составных частей СТС;
- τ_6 – длительность проведения мероприятий МОТД составных частей СТС;
- ω_1 – параметр распределения Эрланга;
- ω_2 – параметр потока отказов при проведении ТО;
- ω_6 – параметр потока отказов при выполнении мероприятий МОТД;
- λ_i – интенсивности отказов i -х составных частей в работоспособном состоянии.

Расчет величины эксплуатационных затрат

Средние затраты на пребывание системы в i -м состоянии:

$$C_i = C_{ii} \bar{t}_i + \sum_{j \in E} p_{ij} C_{ij}, \quad (38)$$

где C_{ii} – средние затраты за единицу времени пребывания в i -м состоянии;

C_{ij} – средние затраты на переход из i -го состояния в j -е.

Для упрощения расчетов принимается, что затраты пропорциональны времени пребывания в i -м состоянии, $C_{ij} \equiv 0$ и $C_i = C_{ii} \bar{t}_i$.

$$\bar{C} = \frac{1}{\bar{t}(X)} \sum_{i=1}^n C_{ii}(X) \pi_i(X) \bar{t}_i(X). \quad (39)$$

Введем величины затрат при нахождении образца вооружения в конкретных состояниях S_1 - S_6 , пусть нахождение системы в работоспособном состоянии S_1 и состоянии скрытого отказа S_4 требует затрат C_{11} . При нахождении системы в состоянии проверки на функционирование S_2 требуются затраты $C_{22} = a C_{11}$, в состоянии ремонта S_3 – $C_{33} = b C_{11}$, в состоянии метрологического обслуживания и технического диагностирования S_6 – $C_{66} = d C_{11}$, с учетом этого получим выражение:

$$\bar{C} = \frac{1}{\bar{t}} \sum_{i=1}^n C_{ii} \pi_i \bar{t}_i = \frac{1}{\pi_1 A} [C_{11} \pi_1 \bar{t}_1 + a C_{11} \pi_2 \bar{t}_2 + b C_{11} \pi_3 \bar{t}_3 + C_{11} \pi_4 \bar{t}_4 + a C_{11} \pi_5 \bar{t}_5 + d C_{11} \pi_6 \bar{t}_6]. \quad (40)$$

Представленное выражение характеризует аналитическую зависимость величины эксплуатационных затрат, приведенных к единице времени, от параметров системы эксплуатации. Стоимость эксплуатации, соответствующая полученному по (31) показателю результативности, определяется выражением (40) и является функцией от параметров, характеризующих систему эксплуатации:

$$\bar{C} = f(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_6, \lambda_i, \omega_1, \omega_2, \omega_6, C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}). \quad (41)$$

Заключение

Предложенный в статье подход к моделированию системы поддержания работоспособного состояния вооружения основывается на полумарковских процессах. Модель отличается от известных тем, что:

- позволяет учитывать не только мероприятия технического обслуживания и ремонта, но и мероприятия метрологического обслуживания средств измерения, а также проведение технического освидетельствования (диагностирования) объектов государственного технического надзора, входящих в состав вооружения;
- позволяет учитывать две разновидности отказа элемента, в случае когда отказы различимы по интенсивностям отказов и с точки зрения критичности отказа.

Полученные аналитические зависимости позволяют оценить и сравнить коэффициенты готовности и величину эксплуатационных затрат для различных агрегатов (изделий). Модель может быть применена для анализа как существующей системы поддержания готовности к применению эксплуатируемого вооружения, так и при создании системы эксплуатации вновь создаваемого образца вооружения.

Оптимизация параметров модели любым из известных методов позволит определить значения эксплуатационных и стоимостных параметров, которые обеспечат минимальные эксплуатационные затраты при заданном коэффициенте готовности.

Список использованных источников

1. Теоретические основы эксплуатации вооружения: Учеб. пособ. / Под общ. ред. В.М. Эйбшица. – Л.: МО СССР, 1977. – 260 с.
2. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
3. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов: Учеб. пособ. для втузов. – М.: Высшая школа, 1987. – 400 с.
4. Дьяков А.Н., Решетников Д.В. Оптимизация эксплуатационных процессов путем управления стоимостью жизненного цикла продукции // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8(7). – С. 1528-1532.
5. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.