

Медведев В.М., Мищенко В.И.*, Солоха Н.Г.*

ОАО «Долгопрудненское научно-производственное предприятие», г. Долгопрудный,
*Военная академия войсковой ПВО ВС РФ, г. Смоленск,

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ

Данная статья посвящена решению задач комплексного обоснования требований к основным параметрам системы эксплуатации изделий. Предложена методика совместной оптимизации полноты контроля и сроков технического обслуживания изделий.

Немаловажную роль при организации эксплуатации изделий играет выбор концепции их обслуживания. Под концепцией эксплуатации предлагается понимать систему правил управления техническим состоянием изделий в эксплуатации, а также основные принципы технического обслуживания и ремонта данного класса и номенклатуры изделий, реализованные:

- в конструктивном исполнении;
- в системе эксплуатационной, ремонтной документации и документации боевого управления (применения);
- в разработанных и предусмотренных эксплуатационной документацией технических средствах системы технического обслуживания и ремонта;
- в принятых решениях по организации восстановления технического состояния, развертыванию технических средств, эшелонированию и накоплению ЗИП.

Выбор концепции эксплуатации в сложившихся условиях позволяет обеспечить либо наибольшую эффективность при фиксированных затратах, либо наименьшие затраты при уровне эффективности не ниже заданного.

На последнем вековом этапе развития изделий имели место три основные концепции их эксплуатации:

- концепция эксплуатации «изделие-патрон», при которой исключается необходимость контроля технического состояния и возможность ремонта (восстановления) в войсках. Их восстановление предполагается в Центре;
- концепция эксплуатации контролепригодных в эксплуатации и неремонтопригодных в эксплуатации изделий;
- концепция эксплуатации контролепригодных и ремонтпригодных в эксплуатации изделий.

Исследования складывающейся при реализации каждой из названных концепций эксплуатации предполагают необходимость обоснования:

- характеристик контролепригодности, обеспечивающих требуемую достоверность контроля технического состояния;
- рациональных параметров системы технического обслуживания;
- рационального состава и номенклатуры комплектов ЗИП.

Методологической основой такого обоснования является моделирование процесса функционирования системы эксплуатации, которую можно рассматривать как сложную систему.

Для оценки влияния характеристик контроля технического состояния на надежность и, следовательно, на готовность изделий к применению необходимо выбрать соответствующий показатель.

Очевидно, что этот показатель должен быть комплексным, отражающим влияние на боеготовность изделия основных параметров системы эксплуатации.

В качестве таких показателей традиционно используются введенные ГОСТами комплексные показатели надежности: коэффициент готовности (K_r), коэффициент оперативной готовности ($K_{ог}$), коэффициент технического использования ($K_{ти}$) и комплексный показатель – коэффициент боевой готовности ($K_{бр}$). В связи с нетрадиционным описанием решаемой задачи авторы настоящей работы сознательно отходят от общепринятых методов статистической оценки показателей изделий как объектов одноразового применения.

1. Концепция эксплуатации «изделие-патрон»

Коэффициент готовности определяется как вероятность того, что ракета окажется в

работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых ее применение не предусматривается. Таким образом, коэффициент готовности в таком виде может использоваться для необслуживаемых систем. Обозначим его $K_{ГН}$, и тогда для простого альтернирующего процесса восстановления его марковская модель описывается графом, представленным на рис. 1.

Уравнения Колмогорова для такой модели имеют вид

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t), \\ P_1(t) + P_2(t) = 1. \end{cases} \quad (1.1)$$

Для стационарного процесса и с учетом условия нормировки

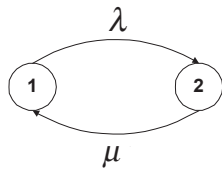
$$\begin{cases} -\lambda P_1 + \mu P_2 = 0, \\ P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

$$-\lambda P_1 + \mu(1 - P_1) = 0, P_1(\lambda + \mu) = \mu, P_1 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}, \quad (1.2)$$

Так как $\lambda = \frac{1}{T_o}$, а $\mu = \frac{1}{T_B}$ (1.3)

где T_o – средняя наработка на отказ;
 T_B – среднее время восстановления.
 Тогда

$$P_1 = \frac{1}{T_B \left(\frac{1}{T_o} + \frac{1}{T_B} \right)} = \frac{1}{\frac{T_B}{T_o} + 1} = \frac{T_o}{T_o + T_B} = K_{ГН} \quad (1.4)$$



λ и μ – интенсивности отказов и восстановлений.

Рисунок 1. Граф состояний модели эксплуатации необслуживаемой системы

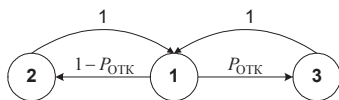


Рисунок 2. Граф состояний модели процесса эксплуатации изделий как обслуживаемых систем

Для обслуживаемых систем в таком виде этот показатель применяться не может.

Полученные результаты, несмотря на очевидность, тем не менее позволяют сделать следующие промежуточные заключения:

- отсутствие достоверной информации о средней наработке на отказ (в силу их неконтролируемости) изделия исключает возможность определения времени средней наработки на отказ и, следовательно, исключает какую-либо достоверность сведений о вероятности пребывания изделия в исправном состоянии;

- учитывая, что в принятой стратегии эксплуатации изделия не восстанавливаются (среднее время восстановления стремится к бесконечности), коэффициент готовности, в свою очередь, – к нулю.

Данная концепция эксплуатации оправдывает себя в условиях регламентированных требований к времени восстановления изделий – в условиях действия гарантийных обязательств поставщика, а также при временах наработки аппаратуры изделий, существенно меньших среднего времени наработки на отказ.

2. Концепция эксплуатации контролепригодных в эксплуатации и неремонтопригодных в эксплуатации изделий

В данном случае рассматривается обслуживаемая техническая система, в рамках которой контролируется техническое состояние и имеет место ремонт (восстановление). Это восстановление заключается в замене отказавшего элемента или в установке параметра в соответствующем поле допусков. Формальное описание такого процесса эксплуатации может быть представлено полумарковской моделью, граф которой представлен на рис. 2.

Где: $P_{отк} = 1 - \exp\left(-\int_0^{T_{об}} \lambda(t) dt\right)$ – вероятность возникновения отказа изделия. Для нормального участка процесса эксплуатации $\lambda(t) = \text{const}$ и $P_{отк} = 1 - \exp(-\lambda T_{об})$, где $T_{об}$ – период технического обслуживания.

Условные функции распределения продолжительности пребывания в состояниях имеют вид:

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{об}, \\ 1, & t \geq T_{об}; \end{cases}$$

$$F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1 - \exp(-\lambda t)}{1 - \exp(-\lambda T_{о6})}, & 0 < t < T_{о6} \\ 1, & t \geq T_{о6}; \end{cases}$$

$$F_{21}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{ТО}, \\ 1, & t \geq T_{ТО}; \end{cases} \quad F_{31}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{ТО} + T_B, \\ 1, & t \geq T_{ТО} + T_B. \end{cases} \quad (2.1)$$

Безусловные функции распределения $F_i(t)$ определяются в соответствии с формулой

$$F_j(t) = \sum_{i=1}^3 F_{ij}(t) \omega_{ij},$$

где ω_{ij} – вероятность перехода вложенной марковской цепи.

$$F_1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - \exp(-\lambda t), & 0 < t < T_{о6} \\ 1, & t \geq T_{о6}; \end{cases} \quad (2.2)$$

$$F_2(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq T_{ТО}; \end{cases} \quad F_3(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{ТО} + T_B, \\ 1, & t \geq T_{ТО} + T_B. \end{cases}$$

Среднее время пребывания в состояниях находится по формуле:

$$m_j = \int_0^{\infty} [1 - F_i(t)] dt$$

Тогда

$$m_1 = \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{о6})]; \quad m_2 = T_{ТО}; \quad m_3 = T_{ТО} + T_B.$$

Определим составляющие вектора-строки $P = (p_1, p_2, p_3)$, который является собственным вектором матрицы W , удовлетворяющим условию нормировки. При этом

$$P = P W, \quad \sum_{j=1}^3 P_j = 1, \quad 0 \leq P_j \leq 1, \quad j = \overline{1, r}.$$

Финальное распределение вложенной марковской цепи отыщется в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} P_1 = P_2 + P_3, \\ P_2 = P_1(1 - P_{ОТК}), \\ P_3 = P_1 P_{ОТК}, \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1. \end{cases} \quad (2.3)$$

Решением системы уравнений является набор (P_1, P_2, P_3) :

$$P_1 = \frac{1}{2}; \quad P_2 = \frac{1 - P_{ОТК}}{2}; \quad P_3 = \frac{P_{ОТК}}{2}.$$

Стационарное распределение полумарковских вероятностей состояний процесса отыскивается по традиционной формуле

$$\pi_i = \frac{p_i m_i}{\sum_{j=1}^3 p_j m_j} \quad i, j = \overline{1, r},$$

где p_j – стационарная вероятность пребывания вложенной марковской цепи в j -м состоянии;

m_j – математическое ожидание продолжительности пребывания изделия в j -м состоянии.

Ясно, что показателем эффективности функционирования изделия в ходе эксплуатации также будет вероятность работоспособного состояния. Причем эта вероятность уже будет функцией периода и продолжительности обслуживания, т. е. и $T_{о6}$, и $T_{ТО}$.

Выражение для этой вероятности имеет вид

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{о6})]}{\frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{о6})] + T_{ТО} + [1 - \exp(-\lambda T_{о6})] T_B}.$$

Таким образом, числитель функции π_1 соответствует средней продолжительности пребывания изделия в работоспособном состоянии, а знаменатель – сумме средних времен пребывания в состоянии работоспособности, обслуживания и восстановления. Этот показатель является аналогом коэффициента технического использования, приведенного в ГОСТ.

Под коэффициентом боевой готовности $K_{БГ}$ понимают вероятность нахождения изделия в работоспособном состоянии в любой произвольно выбранный момент времени на заданном интервале эксплуатации продолжительностью $T_э$.

Стационарное значение $K_{БГ}$ определяется по формуле:

$$K_{БГ} = \frac{T_э - (T_{ТО} + T_B + T_C)}{T_э} = \frac{T_о}{T_о + T_{ТО} + T_B + T_C}, \quad (2.4)$$

где T_C – среднее время существования скрытых (необнаруженных) отказов изделия за период эксплуатации $T_э$.

Комплексный показатель эффективности изделия, определяемый как вероятность застать его в работоспособном состоянии в произвольный момент времени и соответствующий по физическому смыслу тому же коэффициенту готовности, выразится формулой

$$K_{ГО} = \frac{T_O}{T_O + T_{ТО} + T_B + T_H + T_{ЛО}}, \quad (2.5)$$

где T_H – среднее время существования неисправностей, выявляемых при проведении ТО и снижающих уровень различного вида избыточности;

$T_{ЛО}$ – среднее время пребывания (объекта контроля) ОК в состоянии с вынужденными повторными проверками для выявления того, что зарегистрированный отказ был ложным;

$T_B = T_D + T_{ЗАМ}$ – среднее время восстановления;

T_D – среднее время диагностирования, зависящее от квалификации эксплуатирующего персонала и эффективности диагностирующих тестов (их достоверности и полноты охвата изделия контролем);

$T_{ЗАМ}$ – среднее время замены отказавшего элемента, зависящее от выбранной в соответствии с концепцией эксплуатации технологии восстановления изделий, в том числе их приспособленности к ремонту (т. е. уровня труднодоступности и простоты разборки и сборки).

Из конечных формул видно, что показатели эффективности, рассчитываемые по ним, не учитывают всего разнообразия воздействующих на изделие существенных параметров системы эксплуатации. Поэтому очевидна необходимость продолжения исследований и применения других моделей. Так, модель профессора Е.И. Сычева насчитывает шесть состояний процесса эксплуатации объекта эксплуатации:

E_1 – работоспособное состояние;

E_2 – отказ;

E_3 – проверка отказавшего объекта;

E_4 – объект восстанавливается;

E_5 – проверка работоспособного объекта;

E_6 – необнаруженный отказ объекта.

Граф изменения состояний представлен на рис. 3, где D – вероятность обнаружения отказа в ОК.

Матрица вероятностных переходов имеет вид:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & P_a & 0 & 0 & 1-P_a & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1-F \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & D & 0 & 1-D \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & F & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \end{matrix}$$

Система уравнений финальных вероятностей вложенной марковской цепи запишется в виде:

$$\begin{cases} P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1; \\ P_1 = P_4 + (1-F)P_5; \\ P_2 = P_a P_1; \\ P_3 = P_2 + P_6; \\ P_4 = D P_3 + F P_5; \\ P_5 = (1-P_a) P_1; \\ P_6 = (1-D) P_3. \end{cases}$$

Математические ожидания времени пребывания ОК в j -х состояниях запишутся в виде

$$m_1 = \int_0^{T_{06}} t dP_a(t) + T_{06} [1 - P_a(T_{06})];$$

$$m_2 = T_{06} P_a(T_{06}) - \int_0^{T_{06}} t dP_a(t);$$

$$m_3 = m_5 = T_r, \quad m_4 = T_D, \quad m_6 = T_j /$$

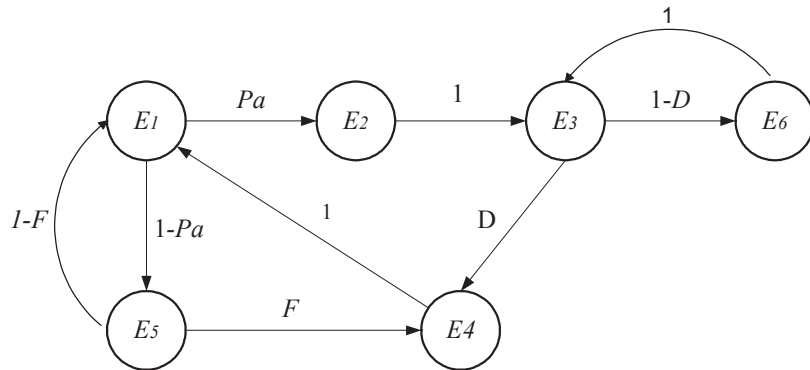


Рисунок 3. Уточненный граф состояний процесса эксплуатации изделий как обслуживаемых объектов

Финальная вероятность работоспособного состояния изделия имеет вид:

$$\pi_1 = \frac{1 - \exp(-\lambda T_{об})}{\left[\frac{\lambda T_{об}}{D} + \exp(-\lambda T_{об}) \right] [1 - \exp(-\lambda T_{об})] + \lambda T_{к} \left[\frac{1 - \exp(-\lambda T_{об})}{D} (1 - D) + 1 \right]}{\rightarrow [1 - \exp(-\lambda T_{об})(1 - F)] \lambda T_{В}} \rightarrow \quad (2.6)$$

Приведенная модель учитывает метрологическое обеспечение (МтО) эксплуатации изделия, т. е. качество контроля технического состояния, оцениваемое ошибками первого и второго родов, но не учитывает безотказность средств измерений. Кроме того, в этой модели не учитывается эффективность технического обслуживания, определяемая обеспеченностью запасными частями, а также стратегией их пополнения.

3. Концепция эксплуатации контролепригодных и ремонтпригодных в эксплуатации изделий

Среди параметров системы эксплуатации изделий немаловажное место занимает продолжительность восстановления. При этом одной из самых влиятельных компонент этого параметра является достаточность технологической оснастки и комплектов ЗИП (Тех.О и ЗИП).

Среди показателей достаточности основное место занимают коэффициент готовности и среднее время задержки. Очевидно, что вероятность отказа системы «Изделие – ЗИП», дополняющая коэффициент готовности до единицы, также может быть использована в качестве показателя достаточности технологической оснастки и комплектов ЗИП. С учетом вышесказанного, а также всех слагаемых среднего времени восстановления, приведенных ранее, граф состояний и матрица переходов вложенной марковской цепи рис. 3 примут вид, представленный на рис. 4.

Для обоснования параметров системы эксплуатации изделий с учетом достаточности комплектов ЗИП необходима доработка полумарковской модели.

С учетом изменения графа и проведения стандартных выкладок средняя продолжительность восстановления определяется по формуле:

$$T_{В} = T_{ЗАМ} + T_{Д} + P_{ЗО} (T_{ЗИП} + P_{ЗГ} T_{ЭД}).$$

Таким образом, коэффициент готовности изделия теперь является функцией:

– продолжительности восстановления – $T_{В}$, зависящей от конструктивных особенностей изделия;

– качества проектирования и организации пополнения комплектов запасных элементов – вероятностей отказов комплектов ЗИП $P_{ЗО}$, $P_{ЗГ}$;

– уровня безотказности изделия, зависящего от условий и интенсивности эксплуатации, квалификации эксплуатирующего персонала, – $P_{А}$ или $\lambda_{А}$;

– продолжительности диагностирования (локализации отказов) – $T_{Д}$, зависящей от уровня автоматизации контроля параметров изделия и определяющей требуемый уровень квалификации обслуживающего персонала;

– продолжительности замены отказавшего элемента – $T_{ЗАМ}$, зависящей от конструкции изделия;

– времени задержки – $T_{ЗИП}$, зависящего от распределения запасных элементов между комплектами и правильности проектирования комплектов ЗИП;

– времени экстренной доставки – $T_{ЭД}$, зависящего от вышеназванных последних факторов и удаленности изделия от завода-изготовителя или арсеналов.

При этом в качестве показателя достаточности Тех.О и ЗИП, как видно из приведенных выше формул, выступает коэффициент готовности образца вооружения, зависящий от периодичности и объема технического обслуживания, номенклатуры и состава комплектов ЗИП и других эксплуатационных факторов.

В качестве теоретического аппарата модели использована теория марковских случайных процессов. В частности, эта теория используется для расчета вероятностей отка-

за систем «Изделие – ЗИП-О» и «Изделие – ЗИП-Г» – P_{30} , $P_{3Г}$.

Вероятность отказа системы «Изделие – Тех.О и ЗИП» определяется как средняя по времени величина вероятности того, что образец вооружения простаивает из-за того, что в комплекте Тех.О и ЗИП был исчерпан запас элементов данной номенклатуры, т. е.

$$P_{отк.ЗИП} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T p(t) dt,$$

где: T – рассматриваемый период, в течение которого может отказать Тех.О и ЗИП; $p(t)$ – вероятность того, что в момент времени t будет исчерпан запас элементов исследуемого комплекта Тех.О и ЗИП.

Для расчета вероятности $p(t)$ разрабатывается модель функционирования системы «Изделие – ЗИП». При этом предполагается, что интенсивность отказов зависит только от типа элемента и от места нахождения этого элемента: на образце вооружения или в запасе. Но для изделия это не характерно, так как подавляющее большинство элементов изделия резерва не имеет. В качестве модели

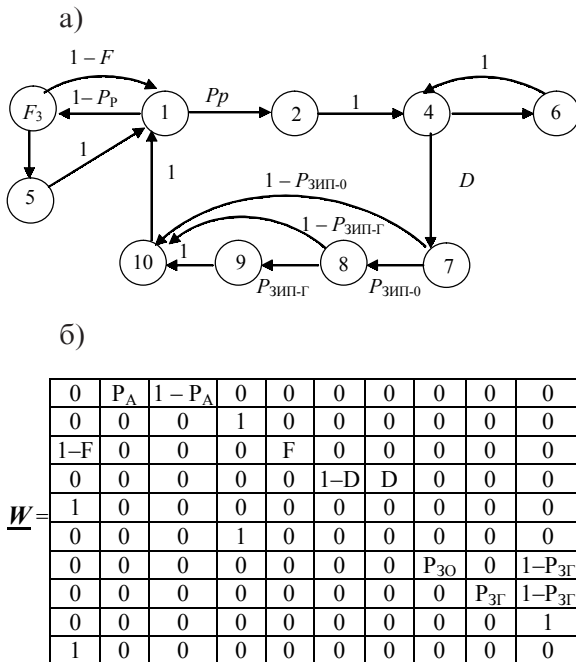


Рисунок 4. Базовая модель процесса эксплуатации изделия, учитывающая достаточность комплектов ЗИП: А) – размеченный граф полумарковского процесса, описывающего взаимодействие изделия с системой его эксплуатации. Б) – матрица переходов вложенной марковской цепи

функционирования системы «Изделие – ЗИП» используем марковскую цепь с дискретным (и конечным) числом состояний и непрерывным временем. Вероятность переходов такой цепи из состояния в состояние зависит от потока отказов элементов и стратегий пополнения запасных элементов. Состояние цепи соответствует полной укомплектованности запасными элементами и работоспособными элементами в образце вооружения (начальное состояние), отказом и восстановлением элементов образца при расходе запасных и состоянию отказа системы «Изделие – ЗИП», когда возникает отказ основного элемента и отсутствует его номенклатура в запасе.

Таким образом, пусть x_0, x_1, \dots, x_s – состояние дискретной марковской цепи. Тогда переходные вероятности цели $P_{ij}(t)$ и интенсивности перехода связаны системой уравнений Колмогорова

$$\frac{dP_{ij}}{d\tau}(\tau) = \sum_{k=0}^s a_{kj} P_{ik}(\tau), \quad i, j = 0, \dots, s$$

с начальными условиями, соответствующими вероятностям состояний при $\tau = 0$. Поскольку в начальный момент времени запас комплекта ЗИП полностью укомплектован, в модели будем полагать $P_{00}(0) = 1, P_{i0}(0) = 0, i \neq 0$. Считаем, что в начальный момент времени цепь находится с вероятностью 1 в одном выделенном состоянии, соответствующем наличию в запасе полного набора запасных элементов данного типа.

Обозначим через $P_i(\tau)$ вероятность того, что в момент τ цепь находится в i -м состоянии. В силу предположения о начальном состоянии цепи

$$P_j(\tau) = P_{j0}(\tau), \quad j = 0, \dots, s.$$

Поэтому вероятности $P_j(\tau)$, а они играют в дальнейшем основную роль, также подчиняются системе линейных дифференциальных уравнений:

$$P_j'(\tau) = \sum_{k=0}^s a_{kj} P_k(\tau), \quad j = 0, \dots, s,$$

$\overline{P}'(\tau) = \overline{AP}(\tau)$ – в матричном виде, с начальными условиями:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = \dots = P_s(0) = 0.$$

Пусть s -е состояние марковской цепи отвечает состоянию отказа данного запа-

са. Для вычисления вероятности отказа системы «Изделие – ЗИП» нужно, согласно определению, узнать среднее по времени значение вероятности этого состояния:

$$P_{\text{отк}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_s(\tau) d\tau.$$

При вычислении вероятности отказа могут возникнуть две ситуации:

– одна и та же марковская цепь служит моделью функционирования запаса на конечных интервалах времени $[iT_n, (i+1)T_n]$;

– марковская цепь служит моделью функционирования запаса на бесконечном интервале времени $[0, \infty]$.

В первом случае $P_s(\tau)$ – периодическая функция с периодом T_n . Совершенно ясно, что для таких функций

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_s(\tau) d\tau = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} P_s(\tau) d\tau,$$

поэтому в этом случае для вычисления коэффициента готовности запаса необходимо решить систему линейных дифференциальных уравнений и усреднить $P_s(\tau)$ – s -ю компоненту решения на интервале $(0, T_n)$.

Во втором случае $P_s(\tau)$ имеет стационарное значение $P_s = \lim_{\tau \rightarrow \infty} P_s(\tau)$. При этом очевидно, что

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_s(\tau) d\tau = \lim_{\tau \rightarrow \infty} P_s(\tau) = P_s.$$

Для определения P_s нет необходимости решать систему дифференциальных уравнений, достаточно решить систему линейных алгебраических уравнений, которая получается приравниванием всех производных $P_j(\tau)$ к нулю и добавлением условия нормировки $\sum_{j=0}^s P_j = 1$:

$$\sum_{k=0}^s a_{kj} P_k = 0, \quad j = 0, \dots, s \quad \sum_{k=0}^s P_k = 1.$$

Марковская цепь, моделирующая функционирование запаса в комплекте ЗИП, имеет $n+2$ состояния (n – начальное количество запасных элементов данного типа в ЗИП-О). При $i = 0, \dots, n$ состояние x_i соответствует наличию в запасе $n-i$ запасных элементов; при $i = n + 1$ состояние x_i соответствует отсутствию запасных элементов и наличию очереди из n неудовлетворенных заявок на элементы данного типа. Состояние x_{n+1+1} соответствует отсутствию запаса элементов это-

го типа в комплекте ЗИП (простой изделия из-за отсутствия элементов этого типа). Состояние x_0 – начальное.

При отказе любого элемента данного типа (основного или запасного) происходит переход в следующее (в порядке возрастания номеров) состояние. Интенсивности переходов, соответствующих отказам элементов данного типа, зависят, естественно, от количества исправных элементов данного типа в запасе, т. е. от номера состояния марковской цепи.

Через a_i будем обозначать интенсивность перехода марковской цепи из состояния x_i в состояние x_{i+1}

$$a_i = m\lambda^T + (n-i)\lambda^{XP}, \quad i = 0, \dots, n,$$

где m – количество основных элементов данного типа в изделии; λ^T – интенсивность отказов одного основного элемента данного типа при работе под током; λ^{XP} – интенсивность отказов одного запасного элемента данного типа при хранении в соответствующем комплекте ЗИП.

Конкретный вид марковской цепи определяется в основном концепцией пополнения запаса и организацией использования запасных элементов.

Организация использования запасных элементов, в свою очередь, существенно сказывается на эффективности функционирования системы «Изделие – групповой ЗИП». Это вызвано рядом обстоятельств.

Во-первых, для расчета достаточности этого комплекта надо учитывать реально сложившуюся концепцию пополнения, которая является составной частью концепции эксплуатации изделий. Эта концепция, названная концепцией периодического пополнения с экстренным восстановлением, отличается от концепции периодического пополнения с экстренной доставкой, заложенной в ГОСТ. Названное отличие заключается в том, что периодическое пополнение обеспечивает пополнение номенклатуры и состава ЗИП-Г до полного уровня, а экстренная доставка обеспечивает лишь восстановление самого изделия, а не восстановление изделия и пополнение ЗИП до начального уровня одновременно. Концепция периодического пополнения с экстренной доставкой обеспе-

чивает одновременное пополнение ЗИП и восстановление изделия. Концепция периодического пополнения с экстренным восстановлением может применяться после их оснащения подвижными мастерскими ремонта изделий. Она не раз подтвердила свою эффективность в условиях полигона. Однако закладываемые в групповой комплект ЗИП запасы никак не учитывают и никогда не учитывали такую стихийно сложившуюся концепцию пополнения ЗИП.

Во-вторых, архитектура структур системы обеспечения ЗИП учитывается в значениях величин интенсивностей потоков отказов и восстановлений.

Размеченный граф этой модели представлен на рис. 5.

В графе обозначено:

m – количество элементов в изделии;
 n – количество элементов в комплекте ЗИП;
 λ_i – интенсивности переходов, связанные с интенсивностью отказов элемента и учитывающие не только заложенный уровень безотказности, но и интенсивность эксплуатации.

Для определения вероятности отказа системы «Изделие – ЗИП-Г» достаточно решить систему алгебраических уравнений.

Вероятности состояний отказа ЗИП-Г определяются через вероятность отказа системы «Изделие – ЗИП» в соответствии с классической теорией вероятностей:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \frac{\mu^i v}{\prod_{k=0}^i \lambda_{n-k}} P_{n+1}(t),$$

где $i = \overline{0, n+1}$.

Таким образом, используя указанные зависимости, можно рассчитать номенклатуру и состав комплекта ЗИП-Г, обеспечива-

ющего функционирование системы «Изделие – ЗИП-Г», со структурами систем обеспечения ЗИП, реально используемых в войсковой ПВО с реальной концепцией его пополнения. Расчет $P_{отк}$ осуществляется только для одного типа элемента. Для расчета $P_{отк. ЗИП-Г}$ хотя бы по одному типу, в соответствии с теоремой об умножении вероятностей, в силу независимости отказов систем «Изделие – ЗИП» каждого типа определится по формуле:

$$P^{ЗИП-Г} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_j^{ЗИП-Г}), \quad (3.1)$$

где N – количество типов элементов, закладываемых в ЗИП-Г конкретного образца изделия.

Используя условие нормировки и приравняв к нулю производные, получим:

$$P_{отк. ЗИП-Г} = \frac{1}{1 + v \sum_{i=0}^n \frac{\mu^i}{\prod_{k=0}^i \lambda_{n-k}}}. \quad (3.2)$$

Как следует из описания базовой модели процесса эксплуатации, стадия восстановления включает четыре составляющих состояния:

- состояние диагностирования (локализация места отказа) – состояние 7;
- состояние задержки в восстановлении образца вооружения из-за отсутствия запасного элемента в одиночном комплекте ЗИП базы – состояние 8;
- состояние задержки в восстановлении образца вооружения из-за отсутствия запасного элемента в групповом комплекте ЗИП и необходимости экстренной доставки из неисчерпаемого источника пополнения (арсенала, завода-изготовителя) требуемого количества запасных элементов, как для вос-

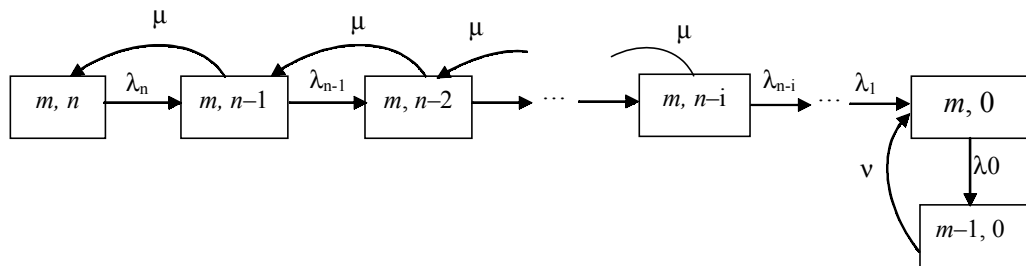


Рисунок 5. Модель функционирования системы «Изделие – ЗИП-Г», учитывающая экстренное восстановление

становления отказавшего образца, так и для исчерпанного запаса в комплекте ЗИП – состояние 9;

– состояние замены отказавшего элемента – состояние 10.

Такая организация восстановления соответствует, во-первых, традиционной двухуровневой структуре системы обеспечения ЗИП, а во-вторых, не учитывает агрегатный (блочный) вид текущего ремонта изделия.

В связи с этим «восстановительная» часть исходной модели была пересмотрена не только с точки зрения адаптации к новым структурам системы обеспечения ЗИП, но и к конкретным, реально существующим структурам.

Названные изменения состоят в том, что вводятся состояния, связанные с простым образцом вооружения, когда в нем проводится замена не только отказавшего элемента, но и блока. Кроме того, под временем экстренной доставки в усовершенствованной модели процесса эксплуатации понимается продолжительность простоя образца ВВТ до момента доставки требуемого элемента из ЗИП соседнего подразделения или части. С

одной стороны, продолжительность такой доставки существенно сокращается, но с другой – в результате этой доставки восстанавливается работоспособность только образца вооружения. Сам же комплект ЗИП, из которого был изъят требуемый элемент, будет требовать соответствующего пополнения.

Предложенный подход позволяет решить задачу комплексного обоснования требований к основным параметрам системы эксплуатации изделий, выбрав ее вариант с тем набором указанных параметров, который обеспечивает наибольшее значение коэффициента готовности $K_{ГО}$.

Для совершенствования параметров системы эксплуатации конкретных типов изделий предлагается частная методика совместной оптимизации полноты контроля и сроков технического освидетельствования изделий. Она позволяет рассчитать объем проверок для каждого вида контроля в зависимости от уровня безотказности каждого уровня выделенной иерархической структуры объекта контроля и в комплексе обосновать полноту и периодичность каждого из видов контроля.

Список использованной литературы:

1. АКИМОВ В.Н., МЕДВЕДЕВ В.М., ЭКТОВ В.П. Зенитная управляемая ракета средней дальности. Свидетельство о регистрации полезной модели. М., Роспатент, 2005. – №2005500057
2. АРХАНГЕЛЬСКИЙ И.И., МИЗРОХИ В.Я., СВЕТЛОВ В.Г. и др. Проектирование зенитных управляемых ракет. Московский авиационный институт, – М., 1999. - 695 с. ГОСТ 27.002-89.
3. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
4. ГОСТ 26.656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.
5. МИЩЕНКО В.И. Комплексное обоснование требований к основным параметрам системы эксплуатации радиоэлектронных систем. – Смоленск: ВУ ВПВО ВС РФ, 1999. – 176 с.
6. МЕДВЕДЕВ В.М. Обоснование рациональной полноты контроля и сроков технического освидетельствования ЗУР ЗРК (ЗРС) войсковой ПВО. – Смоленск, ВУ ВПВО, 2002 – 168 с.
7. МЕДВЕДЕВ В.М. Развитие системы технического обслуживания и ремонта ЗУР. Тезисы докладов юбилейной конференции. – Знаменск, 4ГЦМП, 2006 – 8 с.
8. СЫЧЕВ Е.И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М.: РИЦ «Татьянин день», 1993. – 277с.
9. СЫЧЕВ Е.И. Оценка интенсивностей отказов изделий в различных режимах по результатам эксплуатации // Надежность и контроль качества, 1981. – №8. – С. 24 – 30.
10. СЫЧЕВ Е.И., БУРЛАКОВ Е.А., УХАЛКИН В.В. Алгоритм оптимизации объема и периодичностей проверки приборно-модульных автоматизированных измерительных систем // Метрология, 1990. – №3. – с. 14 – 20.
11. СЫЧЕВ Е.И. ТОМИЛЕВ Ю.Ф., ХРАМЕНКОВ В.Н. Планирование метрологического обеспечения технических систем. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. – 288 с.