

УДК: 623.355/359

DOI: 10.53816/23061456_2022_11-12_123

**МОДЕЛЬ РАСХОДА РЕСУРСА ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ СВЯЗИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**MODEL OF RESOURCE CONSUMPTION OF MILITARY COMMUNICATIONS
EQUIPMENT IN VARIOUS TYPES OF OPERATION**

А.В. Угаров

A.V. Ugarov

Военная академия связи им. С.М. Буденного

В статье обоснована необходимость разработки модели расхода ресурса военной техники связи при различных видах эксплуатации. Произведен выбор показателей и критериев наступления предельного состояния исходя из особенностей оперативно-го использования. Предложенную модель можно использовать как инструмент для прогнозирования расхода ресурса и разработки рекомендаций по оценке технического состояния (прогнозируемого и фактического), обоснования рациональных решений и рекомендаций по продлению сроков службы военной техники связи длительного хранения на основе научно обоснованных прогнозов расхода ресурса.

Модель позволяет производить обоснование и расчеты априорных характеристик долговечности и сохраняемости конкретных образцов военной техники связи на различных этапах и в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: техническое обслуживание, расход ресурса, длительное хранение, техника связи и автоматизированных систем управления, состояние.

The article substantiates the need to develop a model of resource consumption of military communications equipment for various types of operation. The choice of indicators and criteria for the onset of the limiting state is made based on the features of operational use. The proposed model can be used as a tool for forecasting resource consumption and developing recommendations for assessing the technical condition (predicted and actual), substantiating rational decisions and recommendations for extending the service life of military communications equipment for long-term storage based on scientifically based forecasts of resource consumption.

The model makes it possible to substantiate and calculate a priori characteristics of durability and preservation of specific samples of military communications equipment at various stages and under various operating conditions.

Keywords: maintenance, resource consumption, long-term storage, communication equipment and automated control systems, condition.

Техническое обеспечение (ТО) войск является одной из важнейших составляющих комплекса мероприятий, направленных на поддержание боеспособности и боеспособности войск в мирное и военное время [1]. К видам ТО отно-

ются: ракетно-техническое обеспечение, артиллерийско-техническое обеспечение, танкотехническое обеспечение, автотехническое обеспечение, инженерно-авиационное обеспечение, инженерно-техническое обеспечение, техническое

обеспечение РХБ защиты; техническое обеспечение средств связи и АСУ, техническое обеспечение по службам тыла, метрологическое обеспечение.

Мировой опыт войн и вооруженных конфликтов свидетельствует о том, что грамотная организация мероприятий технического обеспечения по своевременному восстановлению вооружения и военной техники (ВВТ) в динамике боевых действий является залогом успеха операции [2].

В современных условиях состояния Вооруженных сил требования к боевой готовности, оперативности управления войсками и оружием значительно повышаются, а следовательно, возрастают и требования к мобилизационной готовности соединений и воинских частей связи, которая зависит от состояния системы хранения, обеспечивающей содержание на длительном хранении вооружения и военной техники формирований.

Составляющей боевой готовности является мобилизационная готовность, представляющая собой способность соединений и воинских частей осуществить перевод с мирного на военное время, своевременно начать военные действия и успешно выполнить боевые задачи.

Основная цель создания запасов и закладки ВВТ на длительное хранение (ДХ) заключается в обеспечении возможности развертывания соединений и воинских частей по мобилизационным планам, доукомплектования существующих соединений и частей до штатов военного времени и восполнения боевых потерь.

В данной статье рассматривается общий подход к созданию математической модели расхода ресурса военной техники связи (ВТС) при содержании на ДХ и применении по предназначению.

Военная техника связи, как любая сложная техническая система, обладает свойством надежности, то есть свойством сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Одной из составляющих надежности является долговечность, как свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступле-

ния предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. При этом под предельным состоянием понимается такое состояние ВВТ, при котором ее дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление ее работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [3].

В условиях мирного времени при повседневной деятельности войск предельное состояние может наступить через определенное время использования по назначению или хранения. Понятия ресурс и срок службы непосредственно связаны с понятием критерия предельного состояния.

Так, для автомобилей, кузовов, антенных устройств, электроагрегатов характерны износ и старение основных деталей, восстановление или замена которых возможны только в заводских условиях при наличии соответствующей документации и запасных частей. Причем количественно показатель критерия может быть сведен к двойной оценке — «пригоден к дальнейшему использованию», «не пригоден к дальнейшему использованию».

Для радиоэлектронного оборудования наиболее характерными являются критерии повышения интенсивности отказов и снижения эффективности использования, а также превышение установленных затрат на техническое обслуживание и ремонт. Причем первопричиной снижения эффективности использования, превышения установленных затрат на техническое обслуживание и ремонт следует считать повышение интенсивности отказов как следствие снижения надежности.

В общем случае стадия эксплуатации любого образца ВТС может быть представлена рядом периодов различной длительности t_s , в той или иной степени взаимосвязанных между собой:

- применение по назначению;
- ожидание применения по назначению (кратковременное хранение без мер консервации);
- длительное хранение (в законсервированном или незаконсервированном виде);
- плановые ремонты (средний, капитальный);
- неплановые ремонты;
- контроль технического состояния и техническое обслуживание.

Причем степень жесткости условий эксплуатации того или иного образца ВТС в целом обусловлена характеристиками факторов, воздействующими в эти периоды.

Если обозначить режим эксплуатации для каждого периода ε^s , то его функционал для совокупности режимов, изменяющихся во времени в пределах рассматриваемого периода, можно выразить как

$$\varepsilon^s = \bar{F}(\varepsilon_1^s, \varepsilon_2^s, \dots, \varepsilon_j^s, \dots, \varepsilon_m^s) = \bar{\varepsilon}^s(\varepsilon_j^s, j \cong \overline{1, m}). \quad (1)$$

Тогда каждый ε_j^s режим можно представить через его характеристики как функционал вида

$$\varepsilon_j^s = \bar{F}(Q_j^s, \Pi_{ji}^s, t_{ji}^s, \tau_{ji}^s, \Lambda_{ji}^s, R_{ji}^s), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $Q_j^s(Q_{ji}^s, i = \overline{1, n})$ — совокупность i -х факторов, воздействующих в j -м режиме;

$\Pi_{ji}^s(\Pi_{jik}^s, k = \overline{1, \ell})$ — набор параметров каждого i -го фактора;

$t_{ji}^s(t_{jik}^s, k = \overline{1, \ell})$ — длительность воздействия i -го фактора;

$\tau_{ji}^s(\tau_{jik}^s, k = \overline{1, \ell})$ — наработка ВТС при воздействии i -го фактора;

$\Lambda_{ji}^s(\Lambda_{jik}^s, k = \overline{1, \ell})$ — интенсивность отказов при воздействии i -го фактора;

$R_{ji}^s(R_{jik}^s, i = \overline{1, n})$ — ресурс ВТС, восстановленный при i -м плановом ремонте.

Рассматривая ресурс как функцию отклика ВТС на воздействие ε_j^s режима $R_j^s = f(\varepsilon_j^s)$, с учетом (1), (2) получаем выражение, определяющее суммарное значение ресурса, израсходованного за все время эксплуатации:

$$R_y = \sum_s \sum_{j=1}^m f(\varepsilon_j^s). \quad (3)$$

Для раскрытия функционала (3) наиболее целесообразным представляется использование физического принципа Н.М. Седакина [4], рассматривающего ресурс как некоторый «запас работоспособности» радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), скорость исчерпания которого зависит только от степени жесткости режимов эксплуатации ε .

Причем при сравнении величин ресурса, израсходованного аппаратурой в режимах ε_1 и ε_2 , необходимо соблюдение следующих постулатов, обеспечивающих выполнение основного прин-

ципа автомодельности физико-химических процессов, происходящих в элементах РЭА под воздействием исследуемых режимов:

– остаток ресурса электрорадиоизделий (ЭРИ) и РЭА не зависит от условий, в которых первоначальный ресурс был израсходован;

– при установившемся характере производства РЭА скорость расходования ресурса совпадает с интенсивностью и параметром потока отказов для ЭРИ и РЭА соответственно;

– при оценке величины израсходованного ресурса в каждом из состояний $\varepsilon_i \in \varepsilon / \varepsilon^o$ процесса $\varepsilon(t)$ принимается, что с переходом из одного состояния в другое и обратно физические процессы расходования ресурса сохраняются, меняется только их интенсивность;

– степень «жесткости» воздействия на ЭРИ и РЭА режимов ε_1 и ε_2 может быть однозначно определена устойчивой функциональной зависимостью вида $K = \varphi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, t_1, t_2)$.

Таким образом, в качестве меры ресурса, израсходованного РЭА за время t в режиме ε , целесообразно принять функцию

$$R(t, \varepsilon) = \int_0^t \Lambda(t, \varepsilon) dt, \quad (4)$$

где $\Lambda(t, \varepsilon)$ — интенсивность отказов в режиме ε .

Например, если обозначить $t_{np}(\varepsilon_{np})$ как наработку в режиме применения, а $t_{xp}(\varepsilon_{xp})$ — как длительность хранения в режиме ε_{xp} , то становится очевидным равенство запасов ресурса ВТС, израсходованного в режиме ε_{np} и ε_{xp} :

$$R(t_{np}, \varepsilon_{np}) = R(t_{xp}, \varepsilon_{xp}).$$

Равенство частот отказов и их интегральных значений при общем законе распределения может быть выражено с использованием принципа равных вероятностей:

$$\begin{aligned} P(t_{np}, \varepsilon_{np}) &= P(t_{xp}, \varepsilon_{xp}); \\ \exp \left\{ - \int_0^{t_{np}} \Lambda(t_{np}, \varepsilon_{np}) dt \right\} &= \exp \left\{ - \int_0^{t_{xp}} \Lambda(t_{xp}, \varepsilon_{xp}) dt \right\}; \\ n(t_{np}, \varepsilon_{np}) &= n(t_{xp}, \varepsilon_{xp}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $P(t_i, \varepsilon_i)$, $\Lambda(t_i, \varepsilon_i)$, $n(t_i, \varepsilon_i)$ — вероятность безотказной работы, интенсивность и суммар-

ное количество отказов РЭА за время t_i в режиме ε_i .

Из формулы (5) следует, что хранение РЭА в течение времени t_{xp} по расходу ресурса эквивалентно ее работе в течение t_{np} .

Таким образом, становится очевидным, что время расходования ресурса является универсальной характеристикой для всех режимов эксплуатации, то есть $t(R) = f(R, \varepsilon_j^s)$.

Если рассматривать равенство (4) для какого-то одного стабильного режима эксплуатации ε , то его можно представить в форме

$$R(t) = \int_0^t \Lambda(t) dt = n(t),$$

$$R(T_p) = \int_0^{T_p} \Lambda(t) dt = n(T_p), \quad (6)$$

где $R(t)$ — часть полного ресурса, израсходованного за время t ;

$R(T_p)$ — полный (предельный) ресурс РЭА, выраженный через соответствующее ему количество отказов $n(T)$.

До настоящего момента ресурсные характеристики рассматривались без учета требований к надежности РЭА, которые должны выполняться в процессе эксплуатации. Но на практике ко всем показателям надежности предъявляются требования, ограничивающие их минимальные (или максимальные) значения с целью обеспечения выполнения оперативно-тактических требований к РЭА во всех режимах эксплуатации.

Так, для обеспечения заданного значения $K_{or}(t) = P(t) \cdot K_r(t)$ могут ограничиваться

$$P_{min}(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \Lambda_{max}(t) dt \right\}$$

и (или)

$$K_{rmin}(t) = \frac{1}{1 + \Lambda_{max}(t) / \mu_{min}(t)},$$

где $\Lambda_{max}(t) \leq \Lambda_{tr}(t)$, $\mu_{min}(t) \geq \mu_{tr}(t)$, — требования к интенсивностям отказов и восстановления.

С точки зрения долговечности величина Λ_{tr} определяет максимальный запас ресурса, при израсходовании которого РЭА уже находится на грани несоответствия требованиям по надежности.

Факт достижения предельного состояния для фактического уровня безотказности и ремон-

топригодности определяется техническими критериями предельного состояния

$$M_\Lambda = \Lambda(t) / \Lambda_{tr}(t), \quad M_\mu = \mu(t) / \mu_{tr}(t), \quad (7)$$

где $M_\Lambda \geq 1$, $M_\mu \leq 1$.

Таких критериев может быть два и больше, так как при различных режимах эксплуатации могут предъявляться специфические требования (например, для $\Lambda_{tr}(t_{xp})$ при хранении в законсервированном или незаконсервированном виде).

В этой связи критерии вида (7) могут использоваться и в качестве технико-организационных критериев, определяющих вид предельного состояния ВТС, требующей:

- проведения среднего ремонта;
- проведения капитального ремонта;
- списания.

На основании выражения (6) ресурсные показатели РЭА с учетом предъявляемых требований можно представить в виде

$$R(t) = \int_0^t \left[\frac{\Lambda(t)}{\Lambda_{tr}} \right] dt = \int_0^t K_{pp}(t) dt =$$

$$= \frac{1}{\Lambda_{tr}} \int_0^t \Lambda(t) dt = \frac{n(t)}{\Lambda_{tr}} = \frac{1}{T_p(t)}, \quad (8)$$

где $K_{pp}(t) = \Lambda(t) / \Lambda_{tr}$ — коэффициенты расходования ресурса.

Выражение (8) определяет величину запаса ресурса $R(t)$, израсходованного за время t_i , выраженную в единицах времени. Поэтому в дальнейшем величину $T_p(t_i, \varepsilon)$, определяемую из отношения

$$\frac{1}{T_p(t_i, \varepsilon)} = R(t_i, \varepsilon) =$$

$$= \frac{1}{\Lambda_{tr}} \int_0^{t_i} \Lambda(t, \varepsilon) dt = \frac{n(t_i, \varepsilon)}{\Lambda_{tr}} \quad (9)$$

будем называть ресурсом, израсходованным РЭА при эксплуатации в режиме ε за время $t = t_i$.

При значениях $\Lambda(t, \varepsilon) = \Lambda_{tr}$ и $\Lambda(t, \varepsilon) = M_\Lambda \Lambda_{tr}$ из (9) получаем

$$\frac{1}{T_p^{max}(t, \varepsilon) \Big|_{\Lambda(t, \varepsilon) = \Lambda_{tr}}} = \int_0^{t_p} \frac{\Lambda(t, \varepsilon) dt}{\Lambda_{tr}} = \int_0^{t_p} dt = \frac{1}{t_p};$$

$$\frac{1}{T_p^{np}(t_M, \varepsilon) \Big|_{\Lambda(t, \varepsilon) = M \Lambda_{tp}}} =$$

$$= \int_0^{t_M} \frac{M \Lambda(t, \varepsilon) dt}{\Lambda_{tp}} = \frac{M}{\Lambda_{tp}} \int_0^{t_p} dt = \frac{1}{M \cdot t_p}.$$

Тогда вероятность расходования ресурса $T_p(t, \varepsilon)$ относительно его максимального значения $T^{\max}(t, \varepsilon)$ равна

$$\gamma_p^{\max} = T_p(t, \varepsilon) / T^{\max}(t, \varepsilon) =$$

$$= \frac{n(t, \varepsilon)}{\Lambda_{tp} \cdot t_p} = \frac{n(t, \varepsilon)}{n_{tp}},$$

а вероятность достижения предельного состояния

$$\gamma_p^{np} = T_p(t, \varepsilon) / T^{np}(t, \varepsilon) =$$

$$= \frac{n(t, \varepsilon)}{\Lambda_{tp} \cdot M t_p} = \frac{n(t, \varepsilon)}{M \cdot n_{tp}}.$$

Процесс расходования ресурса РЭА начинается сразу после ввода ее в эксплуатацию и продолжается до момента списания (за исключением периодов проведения плановых ремонтов) [5].

Реализацией процесса расходования ресурса РЭА является возникновение постепенных дефектов элементов $n_n(t)$, израсходовавших свой ресурс. Интенсивность этого процесса определяется значением функции

$$\Lambda_n(t, \varepsilon) = \Phi[t, n_n(t), \varepsilon].$$

В течение всего времени эксплуатации РЭА идет стационарный процесс возникновения внезапных дефектов элементов (n_b), определяемый схемно-конструкционным построением РЭА. Интенсивность его определяется значением

$$\Lambda_b(t, \varepsilon) = \Lambda_b = \text{const}. \quad (10)$$

Интенсивность суммарного потока дефектов элементов в каждый момент времени определяется как

$$\Lambda_{\Sigma}(t, \varepsilon) = \Lambda_b + \Lambda_n(t, \varepsilon). \quad (11)$$

Подставляя значение выражения (11) в формулу (5), получим выражение для определения вероятности безотказной работы РЭА (если принять ее дефект и отказ как синонимы):

$$P(t, \varepsilon) = \exp \left\{ - \int_0^t [\Lambda_b + \Lambda_n(t, \varepsilon)] dt \right\} =$$

$$= \exp \left\{ - \Lambda_b t - \int_0^t \Lambda_n(t, \varepsilon) dt \right\}.$$

Очевидно, что для $\Lambda_b = \text{const}$ закон распределения $P(t, \varepsilon)$ экспоненциальный. Остается решить задачу по определению закона распределения функции $\Lambda_n(t, \varepsilon)$.

Анализ ресурсных характеристик элементов, используемых в РЭАЭ показал, что плотность вероятности распределения значений их ресурса в общей совокупности практически подчиняется нормальному закону (за исключением электровакуумных приборов, лампы бегущей волны (ЛБВ), электролитических конденсаторов, составляющих обычно менее 1 % от общего количества элементов), а предельные сроки хранения имеют распределение, близкое к нормальному [6].

Кроме того, опыт эксплуатации свидетельствует, что время безотказной работы конкретных элементов, определяемое постепенным изменением параметров за счет процессов изнашивания и старения, в целом определяется нормальным законом распределения [7].

Считая, что система ТО ВТС предусматривает планово-предупредительную замену наименее долговечных элементов до исчерпания их ресурса, можно с уверенностью предположить, что функция $\Lambda_n(t, \varepsilon)$ подчиняется нормальному закону распределения и для РЭА в целом.

На основании такого вывода в научно-технической литературе [8] предложен способ определения параметров функции $\Lambda_n(t, \varepsilon)$, заключающийся в следующем.

В соответствии с нормальным законом плотность вероятности распределения значений ресурса R во времени эксплуатации t_s и вероятность безотказной работы в течение t_s равны

$$f(t_s) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - (t_s - R_{cp})^2 / 2\sigma^2 \right\}; \quad (12)$$

$$P(t_3) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \quad (13)$$

$$\times \int_{-\infty}^{t_3} \left\{ \exp \left[-\frac{(t_3 - R_{cp})^2}{2\sigma^2} \right] dt \right\},$$

где σ — среднее квадратичное (стандартное) отклонение t_3 от R_{cp} ;

$R_{cp} = 0,5R$ — средний ресурс.

Рассматривая процесс расходования ресурса при неизменном значении режима ε и используя справедливое для всех законов распределения выражение

$$\Lambda(t) = f(t)/P(t), \quad (14)$$

перейдем к стандартизованной функции плотности вероятности возникновения одного дефекта, выраженной в единицах стандартного отклонения σ

$$\varphi(t) = \sigma f(t). \quad (15)$$

Тогда, с учетом (12) и (13), может быть получена стандартизованная функция интенсивности возникновения каждого дефекта

$$q(t_3) = \varphi(t_3)/P(t_3) \quad (16)$$

и интенсивность возникновения постепенного дефекта

$$\Lambda_n(t_3) = q(t_3)/\sigma. \quad (17)$$

Если построить график функции $\Lambda_n(t_3)$, отложив по оси абсцисс значения $t_i = t_3/\sigma$, а по оси ординат — $\Lambda_n(t_i)$, то площадь, ограниченная графиком функции $\Lambda_n(t_i)$ и перпендикуляром, опущенным из точки $\Lambda_n(t_i)$ на соответствующее значение t_i , определяет величину ресурса, израсходованного элементом РЭА за время t_i

$$R_n(t_i) = \int_0^{t_i} \Lambda_n(t_i) dt = \frac{1}{\sigma} \int_0^{t_i} q(t_i) dt = n_n(t_i), \quad (18)$$

где $n_n(t_i)$ — количество постепенных дефектов, возникших за время t_i .

При значении $R_{cp} = 4,5\sigma$ ($t_{3max} = 9\sigma, t_i = 9$) интеграл (18) определяет максимальное количество постепенных дефектов, при достижении ко-

торого вероятность израсходования полного ресурса ЭРИ можно представить выражением:

$$\gamma_R(t_i) = R(t_i)/R(t_i = 9) \approx 1. \quad (19)$$

Для удобства вычислений значения функции $\tilde{q}(t_i)$ аппроксимированы степенной функцией вида

$$q_n(t_i) = 4,6 \cdot 10^{-3} t_i^{3,5815}. \quad (20)$$

Математическая модель в виде (18) обладает двумя весьма важными достоинствами: универсальностью и простотой. Универсальность ее обеспечивается тем, что основные математические соотношения (12)–(20) обусловлены свойствами нормального распределения и описывают процессы расходования ресурса элементов, единые для всех этапов эксплуатации любого типа РЭА.

И в то же время приведенная модель имеет ряд существенных недостатков, так как она не учитывает:

- степень сложности рассматриваемой РЭА, уровень безотказности ее элементов, составных частей и РЭА в целом;

- оперативно-тактические и технические требования по надежности, предъявляемые к РЭА;

- режимы и условия эксплуатации в соответствии с (1), (2);

- влияние плановых ремонтов;

- влияние системы технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта.

Для характеристики степени сложности РЭА и уровня безотказности ее элементов воспользуемся значением интенсивности внезапных дефектов РЭА

$$\Lambda_B = \sum_{i=1}^N \Lambda_{B_i} = \text{const},$$

где Λ_{B_i} — интенсивность внезапных дефектов i -го элемента РЭА ($i = 1, N$);

N — количество элементов в РЭА.

Требования по надежности, предъявляемые к РЭА, в дальнейшем будем учитывать при помощи максимально допустимого значения суммарной интенсивности внезапных и постепенных дефектов $\Lambda_{доп}(t) = [\Lambda_B(t) + \Lambda_n(t)]$.

В соответствии с выражением (19) и с учетом ранее принятого соотношения $t_i = t_3/\sigma$ можно представить значение $\Lambda_{доп}(t_3)$ как

$$\Lambda_{\text{доп}}(t_3) = \frac{4,6 \cdot 10^{-3} t_{\text{доп}}^{3,5815} \cdot N}{\sigma^{4,5815}},$$

а максимально допустимое значение интенсивности постепенных дефектов — в виде

$$\Lambda_{\text{п}}^{\text{max}}(t_3) = \Lambda_{\text{доп}}(t_3) - \Lambda_{\text{в}}(t_3) = \frac{4,6 \cdot 10^{-3} t_{3\text{max}}^{3,5815} \cdot N}{\sigma^{4,5815}}. \quad (21)$$

По своему физическому смыслу величина $t_{3\text{max}}$ в формуле (21) является ресурсом РЭА T_p до наступления предельного состояния при достижении равенства $\Lambda_{\text{доп}}(t_3) = \Lambda_{\text{п}}(t_3) + \Lambda_{\text{в}}(t_3)$.

Ресурс определяется из выражения (21) следующим образом:

$$3,5815 \ln T_p = 4,5815 \ln \sigma + \ln [\Lambda_{\text{доп}}(t_3) - \Lambda_{\text{в}}(t_3)] - \ln N - \ln 4,6 \cdot 10^{-3};$$

$$T_p = \exp 0,28 \left\{ \begin{array}{l} 4,5815 \ln \sigma + \\ \ln [\Lambda_{\text{доп}}(t_3) - \Lambda_{\text{в}}(t_3)] - \\ - \ln N - \ln 4,6 \cdot 10^{-3} \end{array} \right\}. \quad (22)$$

Величину израсходованного в ходе эксплуатации ресурса $R(t_3)$ относительно его предельной величины $R(T_p)$ можно получить из соотношения

$$\gamma_T = R(t_3)/R(T_p) = \frac{\int_0^{t_3} [\Lambda_{\text{в}}(t_3) + \Lambda_{\text{п}}(t_3)] dt}{\int_0^{T_p} [\Lambda_{\text{в}}(T_p) + \Lambda_{\text{п}}(T_p)] dT} = \frac{\left\{ \Lambda_{\text{в}} t_3 + N \int_0^{t_3} [q(t)/\sigma] dt \right\}}{\left\{ \Lambda_{\text{в}} T_p + N \int_0^{T_p} [q(T)/\sigma] dT \right\}} = \frac{\left(\Lambda_{\text{в}} t_3 + \frac{N \cdot 10^{-3} t_3^{4,5815}}{\sigma^{4,5815}} \right)}{\left(\Lambda_{\text{в}} T_p + \frac{N \cdot 10^{-3} T_p^{4,5815}}{\sigma^{4,5815}} \right)}. \quad (23)$$

Очевидно, что основной задачей при расчете значений T_p и γ_T является определение значения σ , т.к. она является функцией нескольких переменных, отличных, как правило, для различных типов РЭА:

$$\sigma = f(T_{pki}, N_{ki}, \sigma_{ki}, J),$$

где T_{pki}, N_{ki} — ресурс i -го элемента k -го типа в режиме ε_o^s и количество таких элементов в РЭА;

σ_{ki} — среднеквадратичное отклонение значения T_{pki} от его среднего значения;

$k = \overline{1, J}$ — количество k -х типов элементов в РЭА.

Предположим, что РЭА содержит J типов элементов, а каждый тип включает $N_k = \sum_{i=1}^P N_{ki}$ элементов. Значения T_{pki} и σ_{ki} определены, позволяют рассчитать величины T_{pk} и соответствующие им значения σ_k . Тогда выражение (21) можно представить в виде:

$$\Lambda_i(T_p) = \frac{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_p^{3,5815} \cdot N_1}{\sigma_1^{4,5815}} + \frac{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_p^{3,5815} \cdot N_2}{\sigma_2^{4,5815}} + \dots + \frac{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_p^{3,5815} \cdot N_J}{\sigma_J^{4,5815}} = \frac{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_p^{3,5815}}{\sigma_J^{4,5815}} \left(\frac{\sigma_J^{4,5815} \cdot N_1}{\sigma_1^{4,5815}} + \dots + \frac{\sigma_J^{4,5815} \cdot N_J}{\sigma_J^{4,5815}} \right) = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_p^{3,5815} \sum_{k=1}^J \frac{N_k}{\sigma_k^{4,5815}}. \quad (24)$$

Соответственно и выражения (22), (23) примут вид:

$$T_p = \exp 0,28 \left\{ \begin{array}{l} \ln [\Lambda_{\text{доп}}(t_3) - \Lambda_{\text{в}}(t_3)] - \\ - \ln \sum_{k=1}^J \frac{N_k}{\sigma_k^{4,5815}} + 5,382 \end{array} \right\}; \quad (25)$$

$$\gamma_T = \frac{\left(\Lambda_{\text{в}} t_3 + 10^{-3} t_3^{4,5815} \sum_{k=1}^J \frac{N_k}{\sigma_k^{4,5815}} \right)}{\left(\Lambda_{\text{в}} T_p + 10^{-3} T_p^{4,5815} \sum_{k=1}^J \frac{N_k}{\sigma_k^{4,5815}} \right)}. \quad (26)$$

До настоящего момента соблюдалось условие, что в течение всего времени эксплуатации t_s поддерживается постоянный режим ε_j^s . Но если каждому конкретному режиму эксплуатации ε_j^s , действующему в течение времени t_j^s , поставить в соответствие значения коэффициентов жесткости условий эксплуатации (10) $K_j^s(\varepsilon_j^s, t_j^s)$, обеспечивающие ускорение или замедление процессов расходования ресурса по сравнению с режимом ε_i^s , то их влияние на значение выражений (24) и (26) определяется следующим образом:

$$\Lambda_{\Pi}(t_s) = 4,6 \cdot 10^{-3} \sum_{j=1}^S (K_{y_j} t_{\varepsilon_j})^{3,5815} \times \sum_{k=1}^J \frac{N_k}{\sigma_k^{4,5815}}; \quad (27)$$

$$\gamma_T = \frac{\left[\Lambda_{\text{в}} \sum_{j=1}^S K_{y_j} t_{\varepsilon_j} + 10^{-3} \sum_{j=1}^S (K_{y_j} t_{\varepsilon_j})^{4,5815} \cdot \sum_{k=1}^J \frac{N_k}{\sigma_k^{4,5815}} \right]}{\left(\Lambda_{\text{в}} T_{\text{п}} + 10^{-3} T_{\text{п}}^{4,5815} \cdot \sum_{k=1}^J \frac{N_k}{\sigma_k^{4,5815}} \right)},$$

где K_{y_j} — коэффициент ускорения расходования ресурса при воздействии режима ε_j^s ($j = 1, S$); t_{ε_j} — длительность воздействия режима ε_j^s при эксплуатации.

Необходимо отметить, что выражения (24)–(27) определяют только «расходную» часть, без учета процессов восстановления ресурса РЭА при плановых ремонтах.

Выводы

Разработанная модель позволит:

- определить численное и вероятностное значение израсходованного ресурса при использовании статистической информации о наработке (длительности эксплуатации) и отказах (дефектах) ВТС на различных этапах эксплуатации;
- получить прогнозируемые значения суммарного количества отказов (дефектов) и израсходованного ресурса, соответствующих определенной длительности и режимам эксплуатации;
- определить (спрогнозировать) сроки службы ВТС, соответствующие заданным этапам и режимам ее эксплуатации.

Литература

1. Руководство по техническому обеспечению связи и автоматизированных систем управления. — М.: МО. 2018. 230 с.
2. Тараканов К.В., Овчаров Л.А., Тырышкин А.Н. Аналитические методы исследования систем. — М.: Сов. Радио, 1974. 241 с.
3. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2018. 28 с.
4. Седякин Н.М. Об одном физическом принципе теории надежности и некоторых его приложениях. — Л.: ЛВИКА им. А.Ф. Можайского. 1965. 41 с.
5. Заключительный отчет по НИР «Ресурс». 16 ЦНИИ, 2000. 144 с.
6. Прытков С.Ф., Горбачева В.М., Мартынова М.Н., Петров Г.А. Надёжность электрорадиоизделий. Справочник. — М.: МО РФ, 2004. 641 с.
7. Базовский И. Надежность: теория и практика (перевод с англ.). — М.: Мир, 1965. 373 с.

Referesense

1. Rukovodstvo po tekhnicheskomu obespecheniyu svyazi i avtomatizirovannyh sistem upravleniya [Manual for technical support of communications and automated control systems]. — Moscow: MO. 2018, 230 p.
2. Tarakanov K.V., Ovcharov L.A., Tyryshkin A.N. Analiticheskie metody issledovaniya sistem. — Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 241 p.
3. GOST 27.002-2015. Reliability in technology. Basic concepts. Terms and definitions. — М.: Standartinform, 2018. 28 p.
4. Sediakin N.M. About one physical principle of reliability theory and some of its applications. — Leningrad: LVIKA named after A.F. Mozhaisky. 1965. 41 p.
5. Final report about NIR «Resource». 16 CNII, 2000.
6. Prytkov S.F., Gorbacheva V.M., Martynova M.N., Petrov G.A. Reliability of electrical devices. Directory. — М.: MO RF, 2004. 641 p.
7. Basovsky I. Reliability: theory and practice. — Moscow: Mir, 1965, 373 p.