УДК 629.735.05(045)

Ткалич О. П.

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Институт информационно-диагностических систем Национального авиационного университета

Статья описывает работу статистического алгоритма моделирования процесса технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования с учетом достоверности контроля и статистических ошибок.

Введение

Имитационные модели как правило используются для проектирования, анализа и оценки функционирования сложных систем. С их помощью могут строиться как агрегированные, так и детализированные модели, что позволяет использовать принцип множественности моделей [1]. Имитационное моделирование базируется на концепции итеративного построения модели, в ходе которого модель изменяется путем добавления новых или исключения некоторых ее элементов и (или) взаимосвязей между ними. При этом предполагается, что систему можно описать в терминах, понятных вычислительной системе. Статистический метод моделирования предусматривает многократный прогон имитационной модели для набора статистики, что позволяет удовлетворить также требованиям достоверности и системности результатов моделирования.

Постановка проблемы

К безопасности полетов в гражданской авиации предъявляются высокие требования, достигнуть высокой безопасности полетов возможно при правильном выборе стратегии технического обслуживания, в частности, проведения профилактических работ, предполетной и послеполетной подготовок.

Анализ исследований и публикаций

Статья является продолжением цикла статей в области технической эксплуатации. В предыдущих статьях шла речь о правильном выборе стратегии технического обслуживания, достоверности контроля и была приведена формализованная модель системы технического обслуживания [2].

Постановка задачи

Важной задачей является определение оптимальных периодов проведения технического обслуживания в целях снижения экономических затрат и повышения безопасности полетов. В статье описана работа статистического алгоритма процесса технической эксплуатации (ПТЭ) радиоэлектронного оборудования (РЭО).

Разработка альтернативного математического описания полумарковского процесса для построения статистической модели

Для построения статистической модели ПТЭ РЭО кроме приведенного в [2] математического описания, рассмотрим альтернативный вариант задания полумарковского процесса (ПМП), который в ряде случаев более удобен в практическом применении [3].

Согласно разработанному в [2] формализованному описанию, представим процесс технической эксплуатации РЭО как последовательную во времени смену различных состояний ПТЭ. Под состояниями ПТЭ будем понимать соответствующие этапы технической эксплуатации, характеризуемые воздействиями на РЭО обслуживающего (эксплуатирующего) персонала либо внешней среды: использование по назначению, различные виды и формы технического обслуживания и ремонта, техническое диагностирование, хранение, ожидание попадания в каждое из выделенных состояний технической эксплуатации (ТЭ) и т.п. При этом структура выделенных для анализа состояний ПТЭ определяется исследуемой стратегией технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и соответствующей ей стратегией ТЭ, а также полнотой исходной информации о моделируемом процессе.

Моделируемый процесс удобно рассматривать как случайный процесс с дискретными состояниями, т.е. как процесс, возможные состояния которого можно перечислить. С другой стороны, реальный ПТЭ РЭО различных типов характеризуется тем, что переход РЭО из одного состояния ПТЭ в другое в общем случае возможен в любой случайный момент времени. В связи с этим моделируемый процесс будем рассматривать как случайный процесс с непрерывным временем, т.е. как процесс для которого переход РЭО из одного состояния ПТЭ в другое в общем случае может быть осуществлен в произвольный случайный момент времени. Таким образом, опишем ПТЭ РЭО случайным процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем.

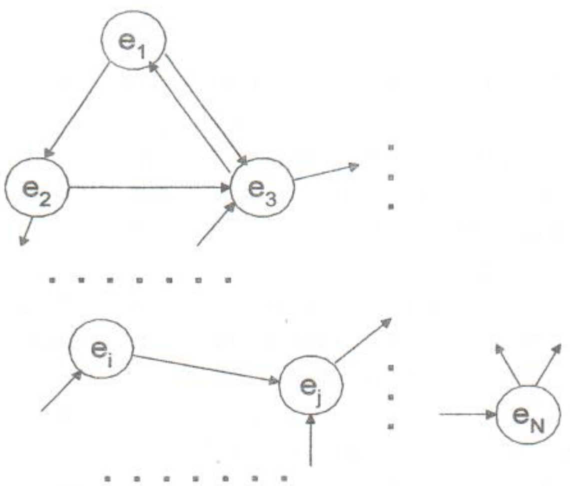

Рис.1. Ориентированный граф состояний и переходов ПТЭ РЭО

Согласно [2], математическую модель ПТЭ геометрически будем изображать в виде стохастического графа состояний и переходов (рис.1). Будем полагать, что стохастический граф состояний и переходов ПТЭ РЭО представляет собой ориентированный граф G, который зададим парой (E, Q), где $E=E(G)$ – непустое конечное множество элементов, определяющих вершины, а $Q=Q(G)$ – конечное множество упорядоченных пар различных элементов из E, определяющих дуги графа. Через $e_1, e_2, \ldots, e_N$ обозначим вершины графа G, а через $q_1, q_2, \ldots, q_M$ – дуги. Таким образом $|E(G)|=N$ – число вершин графа G, $|Q(G)|=M$ – число дуг графа G. Кроме того будем характеризовать граф $G=(E, Q)$ матрицами смежности $A(G)$ и достижимости $D(G)$, имеющих размерность $N\times N$ и определяющих его дуги.

Матрицу $A(G)$ с элементами a_{ij}, $i = 1, 2, \ldots, N$; $j = 1, 2, \ldots, N$ определим как:

$$a_{ij}=\begin{cases}1, & \text{если} \quad q_k=(e_i,e_j)\in Q(G);\\ 0, & \text{если} \quad q_k=(e_i,e_j)\notin Q(G),\end{cases} \qquad (1)$$

где $k=\overline{1,M}$.

Матрицу $D(G)$ с элементами d_{ij}, $i = 1, 2, \ldots, N$; $j = 1, 2, \ldots, N$ определим как:

$$d_{ij}=\begin{cases}1, \text{ если } e_j \text{ достижимо из } e_i \text{ за конечное} \\ \qquad\qquad \text{число переходов;} \\ 0 \text{ в противном случае.}\end{cases} \qquad (2)$$

Обозначим множество выделенных состояний исследуемого процесса ТЭ через

$$E_{\text{ф}}=\left\{e_1^{\phi}, e_2^{\phi}, e_3^{\phi}, \ldots, e_i^{\phi}, \ldots, e_j^{\phi}, \ldots, e_{N_{\phi}}^{\phi}\right\}.$$

В общем случае может быть задано произвольное число $N_{\text{ф}}$ дискретных наблюдаемых физических состояний реального ПТЭ РЭО и произвольные направления переходов между выделенными состояниями (произвольное количество стрелок на графе состояний).

Будем описывать реальный ПТЭ с пространством физических состояний $E_{\text{ф}}$ полумарковской моделью с расширенным относительно $E_{\text{ф}}$ фазовым пространством состояний

$$E=\left\{e_1, e_2, e_3, \ldots, e_i, \ldots, e_j, \ldots, e_N\right\},$$

$N\geq N_{\text{ф}}$, которое характеризуется полумарковским (ПМ) свойством (независимостью вероятностей перехода из состояния $e_i\in E$ и распределений времен пребывания в состояниях от всей предыдущей данному состоянию e_i эволюции процесса $e(t)$), а также дополняет $E_ф$ состояниями, необходимыми для однозначности описания исследуемого ПТЭ. Будем предполагать конечность фазового пространства состояний (ФПС) ПТЭ РЭО:

$$E = \{e_1, e_2, ..., e_N\},\ 2 \le N < +\infty .$$

Таким образом, представим исследуемую систему технической эксплуатации РЭО в виде полумарковской системы S. Тогда фазовое пространство состояний $E = \{e_1, e_2, ..., e_i, ..., e_N\}$ в данной постановке задачи будет представлять собой совокупность возможных состояний технической эксплуатации, индуцируемых техническим состоянием РЭС $\omega(t)$, где e_i – коды соответствующих состояний технической эксплуатации AD ($i = \overline{1, N}$), N – число всех возможных состояний. Пусть в начальный момент времени $t_0 \in$ Т РЭО находится в некотором состоянии ФПС ПТЭ e_i, $i = i_0 \in E$ из которого через некоторое время Θ_n, $n \ge 0$ (n – номер перехода) мгновенно переходит в другое состояние ПТЭ $e_j \in E$. Будем полагать, что процесс переходов по состояниям ПТЭ $e_i \in E$ определяется выбранной стратегией ТОиР u, уровнем эксплуатационно-технических характеристик РЭО рассматриваемого типа, а также условиями Λ ТЭ. Под условиями Λ ТЭ РЭО будем понимать:

- условия работы, интенсивность использования РЭО;
- условия базирования и хранения;
- температурные режимы;
- воздействия окружающей среды, отражающие климатические условия и влияние других явлений природы (температура, влажность, давление);
- квалификацию обслуживающего персонала и качество его работы и др.

Будем полагать, что стратегия ТОиР u, включающая перечень, условия проведения предусмотренных видов и форм технического обслуживания, ремонта, контроля и диагностирования, их объем (трудоемкость, затраты), периодичность (логические условия их проведения) и др., определяет структуру возможных состояний ПТЭ РЭО, т.е. определяет ориентированный граф $G = G(u)$ и соответственно ФПС модели $E = E(u)$. Кроме того, пусть исследуемая стратегия ТОиР u задается вектором параметров, определяющих в свою очередь матрицу независимых собственных функций распределения времени (ФРВ) пребывания в состояниях ПТЭ $Q(T,u) = [Q_{ij}(T,u);\ i,j \in E]$ и матрицу затрат ПТЭ $C(T,u) = [C_{ij}(T,u);\ i,j \in E]$. Затраты будем задавать в единицах стоимости либо в единицах трудоемкости. Под T будем понимать модельное время, характеризующее календарное время эксплуатации РЭО. Также будем полагать, что задано некоторое начальное состояние ПТЭ e_{i_0} при $t_0 = 0$, $i_0 \in E$, $t_0 \in T$, т.е. определено одно из состояний ПТЭ i_0 из N, в котором РЭО находится при $T = 0$.

Таким образом, модель ПТЭ РЭО основывается на следующих допущениях:

- РЭО в любой момент времени t $\in$ Т находится в каком-либо из выделенных для анализа состояний e_i ФПС ПТЭ Е $= \{e_1, e_2, ..., e_N\}$;
- переходы из состояния в состояние ПТЭ $i \to j$ ($i,j \in E$) осуществляются мгновенно (если на переход затрачивается какое-то время, то оно включается во время пребывания в соответствующем состоянии);
- множество выделенных состояний ПТЭ представляет собой полную группу событий:

$$\sum_{i=1}^{N} P_i = 1, \tag{3}$$

где P_i – вероятности пребывания РЭО в соответствующих состояниях ПТЭ e_i ФПС Е;

- время пребывания Θ_n, $n \ge 0$ в каждом из состояний ПТЭ распределено по некоторому известному закону.

Задача состоит в отыскании вектора характеристик исхода $Y^{<R>}(T,u)$ в виде числовых характеристик ПМП с непрерывным временем в дискретном ФПС, математически описывающего течение реального ПТЭ РЭО, для каждой из исследуемых стратегий u. Определим состав искомого вектора характеристик исхода ПТЭ

$Y^{<R>}(T,u)$ на основании конструктивного описания ПМП [4].

Зададим ПТЭ процессом марковского восстановления (ПМВ) $(S_n,\Theta_n;\ n\geq 0)$:

$$S(T)=S_{\nu(T)},\quad T\geq 0, \tag{4}$$

где $\nu(T)=\max\{n:t_n\leq T\}$ – считающий процесс:

$$\nu(T)=n, t_n\leq T<t_{n+1};\ t_n=\sum_{k=1}^{n}\Theta_k,$$

где $n\geq 1$ – моменты смены состояний ПТЭ; Θ_k – интервалы постоянства ПТЭ.

Считающий процесс определяет число переходов РЭО из состояния в состояние ПТЭ, происходящих на отрезке времени [0, Т].

Пусть ПМП $S(T)$ сохраняет постоянные значения на полуинтервалах $[t_n,\ t_{n+1}]$ и непрерывен справа:

$$S(T)=S_n,\ \ t_n\leq t<t_{n+1},\ \ n\geq 0. \tag{5}$$

Тогда, $S(t_n)=\dot{S}_n,\ \ n\geq 0.$

Первая компонента ПМВ $(S_n;\ n\geq 0)$ представляет собой вложенную цепь Маркова (ВЦМ) процесса $S(T)$ и определяет состояния ПТЭ в моменты переходов t_n. Интервалы постоянства процесса $S(T)$ есть:

$$\Theta_{n+1}=t_{n+1}-t_n,\quad n\geq 0. \tag{6}$$

Таким образом, вторая компонента ПМВ $(\Theta_{n+1};\ n\geq 0)$ определяет длительности пребывания РЭО в состояниях S_n ПТЭ $S(T)$.

Разработка статистического алгоритма моделирования процесса технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования

Пусть ФПС $E(u)=\{e_1,\ e_2,\ \ldots,\ e_N\}$, содержащее коды состояний ПТЭ РЭО в соответствии с исследуемой стратегией ТОиР u представляет собой неприводимое замкнутое множество. В этом случае ПМП (5), описывающий реальный ПТЭ, обладает эргодическими свойствами. Содержательно эргодическое свойство ПМП заключается в способности переходить в установившийся режим функционирования, обладающий дополнительными закономерностями, не зависящими от эволюции системы (4) на начальном временном интервале. Наличие стационарного режима (при $T\to+\infty$) позволяет существенно упростить анализ эргодической системы (4).

Для организации статистического алгоритма введем вспомогательные характеристики (статистики модели). Матрицы: $N=\{N_{ij};\ i,j\in E\}$ – для накопления статистики по количеству и направлениям переходов; $T=\{T_i;\ i\in E\}$ – для накопления статистики по временам пребывания в состояниях; $y_r=[y_{r\,n};\ n\in N_{p.};\ r\in R]$ – для хранения статистических значений вектора искомых характеристик исхода ПТЭ РЭО:

$$Y^{\langle R\rangle}(u)=\Big[p_{ij},\pi_i,\bar{l}_{ii},\bar{l}_{ij},P_i,\overline{\Theta}_i,\ \overline{\Theta},\bar{\tau}_{ij},\bar{\tau}_{ii},\bar{\varphi}_{ij},\overline{C}_i,\overline{C}_{уд.i}^{\,ПТЭ},\overline{C}_{уд.}^{\,ПТЭ}\Big]. \tag{7}$$

Также введем эндогенные (внутренние) переменные: $e_{\text{тек.}}$ – для хранения кода текущего состояния; $T_{\text{мод.}}$ – для хранения текущего значения модельного времени, характеризующего календарный срок эксплуатации РЭО; $N_{\text{р.}}$ – для хранения числа реализаций модели.

Для оценки экономических показателей эффективности ПТЭ РЭО, необходимо в вектор характеристик исхода $Y^{<R>}(T,u)$ включить составляющие, характеризующие уровень затрат ПТЭ. Заданная матрица $C(T,u)$ определяет затраты за единицу времени пребывания РЭО в i-м состоянии ПТЭ $C_{ii}(T,u)$ (размерность [единицы затрат/единицы времени]) и затраты на его переход из i-го состояния ПТЭ в j-е $C_{ij}(T,u)$ (размерность [единицы затрат]).

Главная задача состоит в определении времен пребывания в состояниях Θ_i в виде минимума независимых случайных величин, каждая из которых определяет один их факторов, приводящих к изменению РЭО состояния ПТЭ через конечное (случайное) время. Таким образом, стохастическое соотношение

$$\Theta_i=\min\Theta_{ij};\ i,j\in E;$$

где i – текущее состояние, будет служить исходным для статистического моделирования траекторий ПТЭ.

Статистический алгоритм построим по методу "модельных событий" [5], в соответствии с которым будем осуществлять продвижение модельного времени $T_{мод.}$ на промежуток, соответствующий по продолжительности модельному времени до наступления ближайшего перехода РЭО из состояния в состояние ПТЭ, что позволит "протягивать" реализацию ПТЭ вдоль интервалов его постоянства:

$$T_{мод.} = T_{мод.} + \Theta_i. \qquad (8)$$

После очередного перехода РЭО из состояния i в состояние j ПТЭ и накопления изменений в статистиках и эндогенных переменных модели

$$N_{p.} = N_{p.} + 1, \quad e_{тек.} = j, \quad N_{ij} = N_{ij} + 1, \quad T_i = T_i + \Theta_i, \qquad (9)$$

будем производить пересчет значений вектора искомых характеристик исхода ПТЭ $Y^{<R>}(u)$ (4.61) по следующим статистическим формулам [4]:

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{k=1}^{N} N_{ik}}; \ \overline{\Theta}_i = \frac{T_i}{\sum_{k=1}^{N} N_{ik}}; \ \pi_i = \frac{\sum_{k=1}^{N} N_{ki}}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} N_{ij}}; (10)$$

$$\bar{l}_{ii} = \frac{1}{\pi_i}; \ \bar{l}_{ij} = \sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N} p_{ik}\cdot\left(\bar{l}_{kj}+1\right) + p_{ij}; \ \overline{\Theta} = \sum_{i=1}^{N} \pi_i \cdot \overline{\Theta}_i; (11)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = \sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N} p_{ik}\cdot\bar{\tau}_{kj} + \overline{\Theta}_i; \ \bar{\tau}_{ii} = \frac{\overline{\Theta}}{\pi_i}; \ \bar{\varphi}_{ij} = \frac{\pi_i}{\pi_j}\cdot\overline{\Theta}_i; (12)$$

$$P_i = \frac{\pi_i \cdot \overline{\Theta}_i}{\overline{\Theta}}; \quad \overline{C}_i = C_{ii}\cdot\overline{\Theta}_i + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} p_{ij}\cdot C_{ij}; (13)$$

$$\overline{C}^{ПТЭ}_{Уд.i} = \frac{\sum_{j=1}^{N} \pi_j \cdot \overline{C}_j}{\overline{\Theta}_i \cdot \pi_i}; \ \overline{C}^{ПТЭ}_{Уд.} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \pi_i \cdot \overline{C}_i}{\overline{\Theta}}; \ (14)$$

$i, j, k \in E.$

Таким образом, приведенное конструктивное описание ПТЭ РЭО в виде ПМП позволяет выделить следующие частные составляющие вектора характеристик исхода ПТЭ $Y^{<R>}(T,u)$ для нахождения по их значениям искомых показателей технико-экономической эффективности: $P_{ij}(T,u)$ – переходные вероятности ВЦМ в момент перехода РЭО из i-го состояния ПТЭ в j-е; $\pi_i(T,u)$ – вероятности состояний ВЦМ; $l_{ii}(T,u)$ – число шагов, необходимых для возвращения РЭО в i-е состояние ПТЭ; $l_{ij}(T,u)$ – число шагов до первого попадания РЭО из i-го состояния ПТЭ в j-е; $P_i(T,u)$ – вероятности пребывания РЭО в различных состояниях ПТЭ; $\Theta_i(T,u)$ – продолжительность пребывания РЭО в состояниях ПТЭ; $\overline{\Theta}(T,u)$ – средняя продолжительность одного перехода РЭО по состояниям ПТЭ; $\tau_{ij}(T,u)$ – интервал времени до попадания РЭО из состояния i в состояние j ПТЭ; $\tau_{ii}(T,u)$ – время возвращения РЭО в i-е состояния ПТЭ; $\varphi_{ij}(T,u)$ – время пребывания РЭО в состоянии i ПТЭ между двумя последовательными попаданиями в состояние j; $C_i(T,u)$ – затраты ПТЭ на пребывание и выход РЭО из i-х состояний; $C^{ПТЭ}_{Уд.i}(T,u)$ – удельные затраты ПТЭ за единицу времени пребывания РЭО в i-х состояниях; $C^{ПТЭ}_{Уд.}(T,u)$ – удельные затраты ПТЭ (за единицу времени ПТЭ).

Поскольку результаты, получаемые с помощью имитационной модели, носят вероятностный характер, они требуют статистической интерпретации. Решения, принимаемые на основе анализа результатов имитационного моделирования, требуют получения оценок усредненного отклика имитационной модели и его дисперсии. Обе эти оценки зависят от условий эксперимента, к. которым относятся: начальное (исходное) состояние ПТЭ $e_{старт.} \in E$, момент начала сбора статистики $t_{отс.}$, продолжительность реализации (прогона) модели $T_{мод.}$ и число повторных реализаций (прогонов) $N_р$.

Для оценки искомого вектора $Y^{<R>}(u)$ в виде стационарных вероятностных характеристик (10)-(14) эргодического ПМП, используем одну достаточно продолжительную реализацию [6]. При этом искомые вероятностные характеристики исхода ПТЭ РЭЕ (7) получим не как средние по множеству реализаций, а как средние по времени T.

Для этого воспользуемся обычными статистическими формулами для получения состоятельных и несмещенных выборочных оценок математического ожидания (МО) и среднеквадратического отклонения (СКО) [7]:

$$M[y_r]=\frac{1}{N_p}\cdot\sum_{n=1}^{N_p}y_{rn},$$
$$\widehat{S}[y_r]^2=\frac{1}{N_{p.}-1}\cdot\sum_{n=1}^{N_p}\left(y_{rn}-\widehat{M}[y_r]\right)^2, r\in R \qquad (15)$$

где $y_{r\ n}$ – статистическое значения r-й искомой частной характеристики исхода ПТЭ из $Y^{<R>}$ после n-го перехода РЭО из одного состояния ПТЭ в другое ($n\in N_{p.}$); $N_{p.}$ – количество полученных статистических значений искомых характеристик y_r; $M[\ ]$, $S[\ ]$ – МО и СКО соответствующей характеристики исхода соответственно; ^ – знак статистической оценки параметра.

Выборку статистических значений $y_{r\ n}$ будем считать репрезентативной [7], так как она образована случайно, в результате рандомизации с помощью датчиков случайных чисел приложения A.

В начале статистического моделирования ПТЭ РЭО, описываемого эргодическим ПМП (4) наблюдается переходный неустановившийся участок эволюции, а через некоторое время в ПМС устанавливается стационарный режим функционирования, когда МО, СКО и корреляционные моменты искомых вероятностных характеристик y_r, $r\in R$ не зависят от момента времени T, в который рассматривается ПТЭ. Таким образом, при достижении стационарного режима корреляционная функция процесса не зависит от момента времени T:

$$R_{y_r}(T,T+\Delta T)=R_{y_r}(T). \qquad (16)$$

Она определяется зависимостью:

$$\widehat{R}_{y_r}\left(\frac{k\cdot T}{\upsilon_{on.}}\right)=\left(\frac{1}{\upsilon_{on.}-k}\right)\cdot \sum_{\upsilon=1}^{\upsilon_{on.}-k}\left[y_r^{t_\upsilon}-\widehat{M}[y_r]\right]\cdot\left[y_r^{t_\upsilon+k}-\widehat{M}[y_r]\right], \qquad (17)$$

где $\upsilon_{on.}=\dfrac{T}{\Delta t}$ – число опорных точек для построения функции R_{y_r}; $y_r^{t_\upsilon}$ – статистическое значение искомой характеристики y_r в момент времени $t_\upsilon=\upsilon\cdot\Delta t$, $t_\upsilon\in T$; Δt – шаг вычисления опорных точек функции

R_{y_r}; $k=1,2,\ \ldots,\ \upsilon_{\text{оп.}}-1$; $r\in R$.

Если при $T\rightarrow+\infty$ корреляционная функция R_{y_r} для искомых вероятностных характеристик моделируемого процесса $R_{y_r}(T)\rightarrow 0$ ($r\in R$), то случайные значения характеристик исхода ПТЭ $y_{r\ n}$ (7) имитационной модели некоррелированы и распределены одинаково [1]. Данное допущение справедливо, так как законы распределения случайного времени пребывания РЭО в состояниях ПТЭ [$Q_{ij}(u)$; $i,j\in E$] не изменяются от реализации к реализации. Следовательно, в силу центральной предельной теоремы [6] величины выборочных средних $\widehat{M}[y_r]$ можно считать нормально распределенными.

Таким образом, заключение о достижении ПТЭ РЭО стационарного установившегося режима функционирования, будем осуществлять по виду корреляционной функции (функция R_{y_r} становится практически равной нулю или начинает совершать небольшие нерегулярные колебания около нуля). Для облегчения такого анализа воспользуемся более удобной характеристикой – нормированной корреляционной функцией [6]:

$$\widehat{\rho}_{y_r}\left(\frac{k\cdot T}{\upsilon_{on.}}\right)=\frac{\widehat{R}_{y_r}\left(\frac{k\cdot T}{\upsilon_{on.}}\right)}{\widehat{S}_0[y_r]^2}, \qquad (17)$$

где $S_0[y_r]^2=R_{y_r}(0)$ – статистическая оценка постоянной дисперсии стационарного процесса.

С целью уменьшения смещения получаемых статистических оценок искомых характеристик исхода ПТЭ РЭО $Y^{<R>}(u)$ (7) в установившемся режиме, вызванного воздействием начальных условий, воспользуемся методом отсечения, согласно которого начало сбора статистических данных будем задерживать до момента завершения так называемого периода "разогрева". Для этой цели по результатам пробного прогона модели определяется момент отсечения $t_{отс.}$, указывающий что собранные до него данные не учитываются при вычислении статистических оценок (15). Желаемое снижение влияния начальных условий достигается, таким образом, путем уменьшения числа собранных наблюдений $N_р$ в течение переходного периода моделируемого ПТЭ.

Как указывалось выше, метод статистического моделирования является одним из методов имитационного моделирования, таким образом, построенная в данном разделе модель представляет собой имитационную модель (ИМ) стохастического ПТЭ РЭО, основанную на воспроизведении и отслеживании процесса переходов РЭО по состояниям ПТЭ в ходе имитационного прогона (ИП).

Одним из наиболее эффективных подходов к управлению продолжительностью ИП является применение правил автоматической остановки, которые позволяют автоматически отслеживать результаты моделирования через заданные интервалы времени в процессе имитации. Фактически имитация прекращается, когда оценка дисперсии среднего становится меньше заданной величины. В связи с этим, воспользуемся последовательным методом оценки достижения заданной точности и надежности результатов моделирования:

$$P=\left\{\left|\widehat{M}[y_r]-M[y_r]\right|<\varepsilon\right\}=\alpha, \quad (18)$$

где $\widehat{M}[y_r]$, $M[y_r]$ – статистическая оценка и точное значение МО случайной величины y_r соответственно; ε, α – половина доверительного интервала и уровень доверительной вероятности на статистическую оценку $\widehat{M}[y_r]$ соответственно.

Справедливость выражения (18) означает, что оценка $\widehat{M}[y_r]$ построена с абсолютной точностью $\varepsilon > 0$ и достоверностью α.

Согласно указанному методу после каждой n-й ($n \geq 1$; $n \in N_р$) реализации моделируемого ПТЭ и пересчета МО и СКО искомых характеристик $y_{r\ n}$ по формулам (15) произведем вычисление погрешности δ оценки $\widehat{M}[y_r]$ по формуле [1]:

$$\delta\left[\widehat{M}[y_r]\right]=\frac{t_{\alpha,n-1}\cdot\widehat{S}[y_r]}{\sqrt{n}}, \quad (19)$$

где $t_{\alpha,n-1}$ – табличное значение квантиля уровня α t – распределения Стьюдента с n–1 степенями свободы.

Формула (19) справедлива в связи с тем, что статистические значения $y_{r\ n}$ независимы, и при достаточно большом числе n описываются нормальным законом распределения.

Если выполняется условие: $\delta\left[\widehat{M}[y_r]\right]\leq\varepsilon$, то $N_{р.}$ принимается равным n. При этом считается справедливой следующая интервальная оценка:

$$\widehat{M}[y_r]-\frac{t_{\alpha,Np.-1}\cdot\widehat{S}[y_r]}{\sqrt{N_{p.}}}\leq M[y_r]\leq\widehat{M}[y_r]+ +\frac{t_{\alpha,Np.-1}\cdot\widehat{S}[y_r]}{\sqrt{N_{p.}}}. \quad (20)$$

Так как элемент выборки $y_{r\ n}$ искомого вектора $Y^{<R>}$, получаемой в результате имитационного эксперимента, является векторной величиной, т.е.

$$Y^{\langle R\rangle}=(y_{1n}, y_{2n}, \ldots, y_{Rn}),\ r\in R,\ \mathrm{n}=1,2,\ldots, \quad (21)$$

то оценку необходимого числа реализаций необходимо выполнять отдельно для каждой из компонент вектора $Y^{<R>}$. Наибольшее из полученных значений $N_{p.r}$, $(r=\overline{1,R})$ необходимо принять в качестве окончательного числа реализаций $N_{р.}$

В связи с тем, что статистическая оценка $\widehat{M}[y_r]$ сама является случайной величиной, целесообразно оценивать и ее СКО по формуле:

$$\widehat{S}\left[\widehat{M}[y_r]\right]=\frac{\widehat{S}[y_r]}{\sqrt{N_{p.}}}, \quad r\in R. \quad (22)$$

Зависимости (10)-(14) позволяют оценить значения различных частных характеристик исхода ПТЭ РЭО $y_r(u)$ (7) результата $Y^{<R>}(u)$ для каждой стратегии ТОиР $u\in U$ в виде стационарных характеристик эргодического ПМП. Разработанный статистический алгоритм (8)-(22)

был программно реализован в интегрированной среде программирования *DELPHI* на алгоритмическом языке высокого уровня *Object Pascal* в виде программы "*STESMP*", принципиальная блок-схема которой приведена на рис. 2.

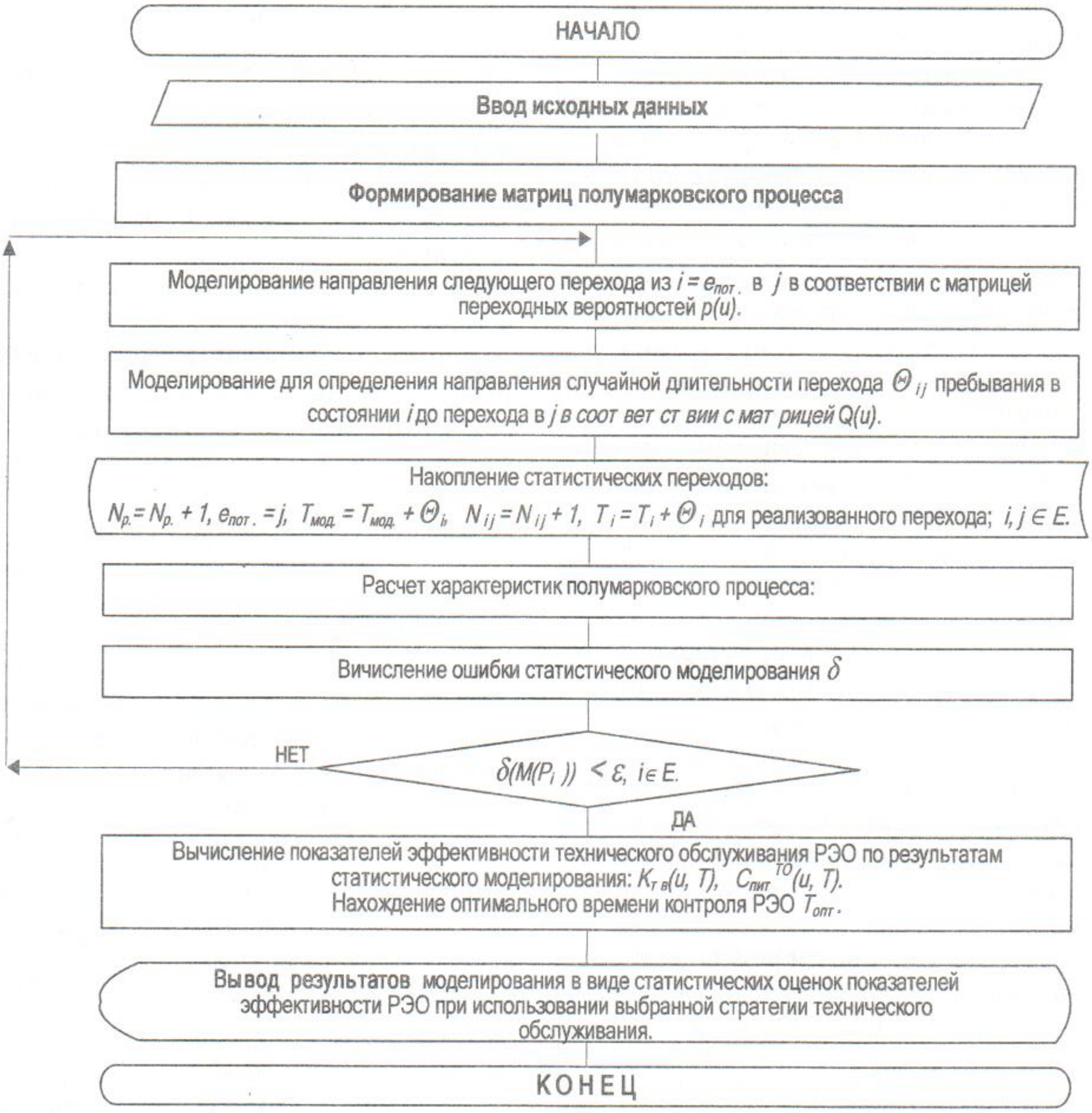

Рис. 2. Алгоритм процесса технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования

Как видно из блок-схемы рис. 2, для сокращения объема производимых по разработанному статистическому алгоритму вычислений введена контрольная характеристика (КХ) модели y'_r $(r \in R)$, по статистическим значениям $y_{r\,n}$ которой, оценивается необходимое число реализаций модели $N_{р.}$, а затем по формуле (19) вычисляется погрешность на статистические оценки МО других искомых характеристик исхода ПТЭ y_r, $r \in R$. Построение корреляционной функции также производится только для КХ модели.

Для повышения эффективности реализации в модели последовательного метода задается стартовое число реализаций $N_{р.старт.}$, после осуществления которых производится оценка достигнутой точности КХ, и шаг (по числу реализаций) проверки достигнутой точности КХ – $\Delta N_{р}$.

Вывод: В статье описано разработанное альтернативное описание полумарковского процесса, являющееся более удобным для практической реализации моделей эксплуатации РЭО при помощи метода статистических испытаний (Монте-Карло). Алгоритм позволяет определить не только показатели технической, но и экономической эффективности организации процесса технической эксплуатации РЭО.

Разработанный алгоритм статистического моделирования позволяет с необходимой точностью и надежностью оценить искомые характеристики полумарковского процесса, являющегося формализованой моделью процесса технической эксплуатации РЭО, на основе чего выполнить численную оценку используемых показателей технико-экономической эффективности. Разработанный алгоритм статистического моделирования позволяет строить полиморфные модели технической эксплуатации РЭО любой сложности без ограничений на число состояний и функции распределения времени пребывания в состояниях. Это существенно отличает разработанную статистическую модель эксплуатации РЭО от известных решений данной научной задачи.

Список литературы

1. *Надежность* и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988. – Т.3: Эффективность технических систем / Под общ.ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – 328 с.
2. *Ткаліч О. П.* Формализована модель системи технічного обслуговування бортового РЕО // Математичні машини і системи, 2005. – №2. – С. 76-89.
3. *Барзилович Е. Ю., Воскобоев В. Ф.* Эксплуатация авиационных систем по состоянию: элементы теории. – М.: Транспорт, 1981. – 197 с.
4. *Королюк В. С.* Стохастические модели систем. – К.: Наукова думка, 1989. – 208 с.
5. *Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов* и др. Технология системного моделирования. – М.: Машиностроение; – Берлин: Техник, 1988. – 520 с.
6. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, Гл. ред. физ.- мат. лит., 1991. – 384 с.
7. *В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин.* Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.