

УДК 629.78

**И.В. БОЙКОВ**

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина*

## УПРАВЛЕНИЕ РЕМОНТОМ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ С ПЕРИОДИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ

Рассмотрена задача определения оптимального решения по выявленным неисправностям радиоэлектронной аппаратуры в результате проведения периодического контроля. Приведена методика принятия решения по выявленным неисправностям.

**стратегия восстановления, периодический контроль, вероятность безотказной работы, средняя продолжительность пребывания в рабочем состоянии**

### Введение

Эффективность эксплуатации периодически контролируемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) во многом зависит от принятия стратегии восстановления, под которой понимаются установленные правила определения необходимости восстановления аппаратуры и сроков проведения восстановительных работ в зависимости от технического состояния РЭА.

При выявлении неисправностей и отказов отдельных элементов аппаратуры, обладающей структурной избыточностью и находящейся в режиме непрерывной готовности к функционированию (непрерывного функционирования), могут использоваться следующие основные стратегии восстановления РЭА:

– стратегия восстановления при неисправности (устранение отказов и неисправностей аппаратуры проводится немедленно при их выявлении);

– стратегия восстановления при отказе (восстановление РЭА проводится немедленно при их отказе);

– стратегия восстановления по состоянию (решение о необходимости восстановления аппаратуры и сроках проведения восстановительных работ принимается исходя из влияния выявленных неисправ-

ностей и отказов на готовность и безотказность РЭА).

Особую актуальность задача оптимизации стратегии восстановления представляет для систем РЭА, удовлетворяющих следующим требованиям.

1. РЭА находится в режиме непрерывной готовности к функционированию (непрерывного функционирования). Для проведения планового технического обслуживания, устранения неисправностей и отказов аппаратура выводится из режима непрерывного функционирования.

2. В РЭА применяются методы структурной избыточности, поэтому при возникновении отказов отдельных элементов возможно сохранение ее работоспособности.

3. При восстановлении РЭА производится устранение всех неисправностей и отказов.

4. Для поддержания требуемого уровня безотказности аппаратуры предусмотрено проведение диагностического контроля с постоянной периодичностью. Контроль достоверен. Локализация места неисправности РЭА – с точностью до резервируемого участка.

К классу систем РЭА, удовлетворяющих перечисленным требованиям, относятся системы защиты и сигнализации для объектов повышенной опасности, аппаратура радиолокационных систем стан-

ций непрерывного слежения для различного рода космических систем.

При отказе такой аппаратуры, выявленном в результате проведения периодического контроля, целесообразно провести восстановление РЭА немедленно, через минимальное время подготовки к восстановлению.

**Целью статьи** является разработка аппарата управления восстановлением выявленных неисправностей радиоэлектронной аппаратуры после проведения контроля с возможностью эксплуатации по техническому состоянию.

### Основная часть

Рассмотрим периодически контролируруемую радиоэлектронную аппаратуру, обладающую структурной избыточностью и находящуюся в режиме, который характеризуется готовым к применению состоянием аппаратуры. Для такой аппаратуры свойственно противоречие требований высокой надежности и готовности (нахождения в готовом к применению состоянии). Готовность РЭА ухудшается с увеличением общей продолжительности восстановления, которая может быть сокращена путем отсрочки ремонтов, совмещения различного вида работ. Надежность же аппаратуры увеличивается при немедленном устранении отказов любых ее элементов, независимо от их влияния на работоспособность всей аппаратуры. Это требует принятия оптимальных решений по управлению ремонтом РЭА.

При отказе аппаратуры, выявленном в результате проведения  $k$ -го периодического контроля, целесообразно провести ее восстановление немедленно. По выявленным же неисправностям РЭА, состоящей из функционально независимых систем, возможны следующие решения:

–  $U_{1k}$  – устранение через некоторое время ожидания восстановительных работ  $t_{н1k}$  неисправностей,

выявленных при  $k$ -м периодическом контроле аппаратуры;

–  $U_{2k}$  – устранение через некоторое время ожидания восстановительных работ  $t_{н2k}$  неисправностей, выявленных при  $k$ -м периодическом контроле и автономных проверках неисправных систем перед восстановительными работами;

–  $U_{3k}$  – не устранение выявленных неисправностей на предстоящем межпроверочном периоде (ПМПП), представляющем собой интервал  $[t_{ок}, t_{mk}]$ ;

–  $U_{4k}$  – не устранение выявленных неисправностей немедленно.

В качестве показателя эффективности принимаемого решения целесообразно принять среднюю продолжительность пребывания РЭА в рабочем состоянии на предстоящем межпроверочном периоде

$$T = \int_{t_{ок}}^{t_{mk}} G(t) dt,$$

где  $G(t)$  – функция готовности, представляющая собой вероятность заставить РЭА работоспособной в момент времени  $t$ .

Задача определения оптимального решения по выявленным неисправностям формулируется следующим образом: найти такое решение  $U_k \in U$  по восстановлению РЭА при выявлении неисправностей в результате проведения  $k$ -го периодического контроля, при котором средняя продолжительность пребывания аппаратуры в рабочем состоянии на ПМПП будет максимальной, а вероятность безотказной работы РЭА в произвольный момент времени ПМПП не ниже требуемой  $P_{mp}$ .

Математическую постановку этой задачи можно представить в следующем виде:

$$\bar{T}_p(U_k^*) = \max \bar{T}_p(U_k);$$

$$P(t) \geq P_{TP}, \text{ при } t_{ок} \leq t \leq t_{mk}.$$

Показатель  $\bar{T}_{p1k}$  эффективности принимаемого решения по выявленным неисправностям при  $k$ -м контроле неисправностям определяется как

$$\bar{T}_{p1k} = \int_{t_{ok}}^{t_{mk}} G(t)dt = \int_{t_{ok}}^{t_{n1k}} P_{UN}(t)dt + \int_{t_{n1k} + \bar{\tau}_{b1k}}^{t_{mk}} P(t)dt,$$

где  $\bar{\tau}_{b1k}$  – средняя продолжительность восстановительных работ по устранению неисправностей, выявленных при  $k$ -м контроле;

$P_{UN1}(t)$  – вероятность нахождения рассматриваемых систем в работоспособном состоянии в момент времени  $t$  после устранения выявленных неисправностей.

В общем случае функция  $P_{UN1}(t)$  представляет собой произведение вероятности  $P_{II}(t)$  нахождения исправной части рассматриваемых систем в работоспособном состоянии в момент времени  $t$  и вероятности  $P_{IN}(t - t_{n1k} - \bar{\tau}_{b1k})$  нахождения восстановленной части систем в работоспособном состоянии в момент времени  $(t - t_{n1k} - \bar{\tau}_{b1k})$ .

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что если функция  $P(t)$  надежности рассматриваемых функционально независимых систем строго убывающая в интервале  $[t_{ok}, t_{mk}]$ , то условие

$$P_N(t_{ok}) > P_{II}(t_{mk})P(t_{mk} - \bar{\tau}_{b1k})$$

является необходимым и достаточным, чтобы функция  $\bar{T}_{p1k}(t_{n1k})$  была унимодальной и имела в рассматриваемом интервале единственную точку  $t_{n1k}^*$  максимума при

$$P_N(t_{n1k}^*) = P_{II}(t_{mk})P(t_{mk} - t_{n1k}^* - \bar{\tau}_{b1k}).$$

Эффективность принимаемого решения  $U_{2k}$  по восстановлению РЭА определяется показателем

$$\bar{T}_{p2k} = \int_{t_{ok}}^{t_{mk}} G(t)dt = \int_{t_{ok}}^{t_{n2k}} P_N(t) + \int_{t_{n2k} + \bar{\tau}_{b2k}}^{t_{mk}} P_{UN2}(t)dt,$$

где  $\bar{\tau}_{b2k}$  – средняя продолжительность восстановительных работ по устранению неисправностей, выявленных при  $k$ -м периодическом контроле и автоматных проверках перед восстановительными работами;

$P_{UN2}(t)$  – вероятность нахождения рассматриваемых систем в работоспособном состоянии в момент времени  $t$  после выполнения решения  $U_{2k}$ .

Функция  $P_{UN2}(t)$  представляет собой произведение вероятности  $P_{INP}(t - t_{nak} - \bar{\tau}_{bak})$  нахождения восстановленной неисправной части систем в работоспособном состоянии в момент времени  $(t - t_{nak} - \bar{\tau}_{bak})$  и вероятности  $P_{IIS}(t - t_{n2k})$  нахождения оставшейся исправной части систем в работоспособном состоянии в момент времени  $t - t_{n2k}$  с учетом падения ее надежности к моменту времени  $t_{n2k}$ .

При исследовании решения  $U_{2k}$  сделан вывод, что если функция  $P(t)$  надежности рассматриваемых функционально независимых систем строго убывающая в интервале  $[t_{ok}, t_{mk}]$ , то условие

$$P_N(t_{ok})P_{IN}(t_{mk} - t_{ok} - \bar{\tau}_{b2k})$$

является необходимым и достаточным, чтобы функция  $T_{p2k}(t_{n2k})$  была унимодальной и имела единственную точку максимума  $t_{n2k}^*$ . Причем, точка  $t_{n2k}^*$  находится в интервале  $[t_{ok}, (t_{ok} + t_{mk})/2]$  при

$$P_N(t_{n2k}^*) = P_{INP}(t_{mk} - t_{n2k}^* - \bar{\tau}_{b2k})P_{IIS}(t_{mk} - t_{n2k}^*).$$

Проведенный анализ показал, что величина оптимальных времен  $t_{n1k}^*$  и  $t_{n2k}^*$  ожидания восстановительных работ зависит от структурной схемы надежности систем с выявленными неисправностями и увеличивается при:

- уменьшении интенсивности отказов элементов;
- уменьшении количества выявленных неисправностей;
- увеличении межпроверочного периода.

С увеличением продолжительности восстановительных работ величина  $t_{n2k}^*$  уменьшается, а величина  $t_{n1k}^*$  практически остается постоянной.

Определение максимума функций  $\bar{T}_{p1k}(t_{n1k})$  и  $\bar{T}_{p2k}(t_{n2k})$  целесообразно производить методом золотого сечения, обладающим высокой вычислительной эффективностью и простотой реализации [1, 2, 5, 6].

Поставленную задачу определения оптимального решения по выявленным неисправностям необходимо решать последовательной оптимизацией. При этом вначале нужно определить максимумы выбранного показателя  $\bar{T}_{p1km}$  и  $\bar{T}_{p2km}$  для вариантов решений  $U_{1k}$  и  $U_{2k}$ , вычислить значение показателя  $T_{p3k}$  для варианта  $U_{3k}$  с накоплением выявленных неисправностей. Затем, согласно критерия наибольшего среднего результата, выбирается вариант принимаемого решения с наибольшим значением показателя  $\bar{T}_p$ .

Методика принятия решения по выявленным неисправностям РЭА в результате проведения  $k$ -го периодического контроля может быть реализована следующим алгоритмом.

1. Определить вероятность безотказной работы рассматриваемых неисправных систем за время  $t_p$ , необходимое для подготовки к восстановительным работам  $P(t_p)$ . Если величина  $P(t_p)$  больше требуемой вероятности  $P_{TP}$ , то перейти к пункту 2. В противном случае приступить к немедленному устранению неисправностей.

2. Определить  $B = P(t_{mk}) - P_{TP}$ . Если  $B > 0$ , то перейти к пункту 3. Если  $B < 0$ , то определить допустимое время  $t_{nd}$  ожидания восстановительных работ, при котором  $P(t_{nd}) = P_{TP}$ .

Определение величины  $t_{nd}$  проводить последовательным приближением, используя метод деления интервала пополам, к значению времени  $t_{nd}$ , при котором

$$P(t_{nd}) - P_{TP} \leq \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность определения вероятности безотказной работы аппаратуры.

3. Определить  $\bar{T}_{p1km}$  и  $\bar{T}_{p2km}$ , используя метод золотого сечения и формулы (1) и (2). Величину выбранного показателя для варианта решения  $U_{3k}$  вычислить по формуле

$$\bar{T}_{p3} = \int_{t_{ok}}^{t_{mk}} P_N(t) dt.$$

При этом интегралы от функций вычислять с использованием приближенного алгоритма, представляющего собой численное интегрирование методом трапеций по значениям функций в трех равноотстоящих друг от друга точках.

4. Вычислить погрешности вычисления величин  $\bar{T}_{p1km}$ ,  $\bar{T}_{p2km}$  и  $\bar{T}_{p3km}$ , принимая за меру погрешности на каждом шаге интегрирования  $[a, b]$  величину [3, 4]:

$$\frac{b-a}{3} \left| f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) \right|.$$

Если абсолютная величина разности двух наибольших значений  $\bar{T}_p$  из  $\bar{T}_{p1km}$ ,  $\bar{T}_{p2km}$  и  $\bar{T}_{p3km}$  больше абсолютной величины разности из погрешностей вычисления, то перейти к пункту 6, в противном случае – к пункту 5.

5. Выполнить пункт 3, уменьшив шаг интегрирования вдвое.

Получается значение выбранного показателя более высокого порядка точности ( $\bar{T}_{pII}$ ) по сравнению с ранее определенными ( $\bar{T}_{pI}$ ). Уточненные значения вычислить по формуле [2]:

$$\bar{T}_p = \bar{T}_{pII} + \frac{1}{3}(\bar{T}_{pII} - \bar{T}_{pI}).$$

6. Выполнить решение  $U_k$ , соответствующее наибольшему значению показателя  $\bar{T}_p$ . При этом, если  $B < 0$ , то восстановительные работы необходимо провести не позже времени  $t_{nd}$ .

Таким образом, оптимальной стратегией восстановления РЭА будет такая стратегия, в которой заложены следующие требования:

– при возникновении отказа аппаратуры восстановление проводить немедленно;

– при возникновении неисправностей необходимость в их устранении и оптимальные сроки проведения восстановительных работ определять с помощью приведенной методики.

Предлагаемая методика принятия решения по выявленным неисправностям систем радиоэлектронной аппаратуры легко реализуется в виде программы.

### Выводы

Анализ методов [1, 5, 6] приближенного вычисления от сложных функций показал, что предложенный в методике приближенно-уточняющий алгоритм численного интегрирования при сравнении возможных решений по выявленным неисправностям и определении оптимальных сроков проведения восстановительных работ является наиболее рациональным с точки зрения затрат машинного времени.

Использование предложенной стратегии восстановления рассмотренного класса систем РЭА позволит:

– минимизировать потери в готовности и безотказности при выявлении неисправностей и отказов аппаратуры;

– в случае большого количества одновременно контролируемой радиоэлектронной аппаратуры распределить по времени силы и средства, необходимые для восстановления, и на основе этого определить их рациональный состав с точки зрения экономии расходов на эксплуатацию аппаратуры.

Применяемый алгоритм принятия решения по выявленным неисправностям в результате проведения периодического контроля аппаратуры может быть использован при создании математического обеспечения автоматизированных систем управления техническим обслуживанием и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры.

Предложенный подход к определению оптимальной стратегии восстановления может быть использован и для непрерывно функционирующей радиоэлектронной аппаратуры.

### Литература

1. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 479 с.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т.1: Методология. Организация. Терминология / Под. ред. А.И. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
3. Реклейтис Г. и др. Оптимизация в технике. Кн. 1. – М.: Мир, 1986. – 349 с.
4. Бахвалов Н.С. и др. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 598 с.
5. Павленко И.П. Основы эксплуатации радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов. – М.: Воениздат, 1988. – 168 с.
6. Тихоменко О.М. Модели массового обслуживания в системах обработки информации. – Минск: Университет, 1990. – 192 с.

*Поступила в редакцию 12.01.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.