

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время трудно представить авиационную технику, в которой не используются радиоэлектронные системы различного назначения. Безопасность и регулярность эксплуатации воздушного транспорта в значительной степени определяются бесперебойной работой многочисленных средств радиообеспечения полетов – различными типами радиоэлектронных систем (РЭС) и устройств (РЭУ).

Важная роль при этом отводится определению состояния указанных объектов, которое вследствие воздействия внешних и внутренних факторов изменяется с течением времени. Знание состояния РЭС, умение использовать методы и средства контроля данного состояния в любой момент времени, позволяет использовать их оптимальным образом, то есть с наибольшей эффективностью. Знание характера и момента изменений, происходящих в той или иной системе, умение предсказывать время наступления этих изменений позволяет пользователю в кратчайшее время и с минимальными затратами осуществлять ремонт и тем самым обеспечивать заданный уровень эксплуатационной надежности средств.

Разрешением круга вопросов, связанных с определением функционального состояния технических объектов и характера его изменения с течением времени, занимается техническая диагностика.

В отличие от теории надежности, которая занимается изучением и использованием для расчетов априорных и апостериорных статистических показателей, характеризующих технические объекты, техническая диагностика занимается изучением методов и средств, характеризующих действительное состояние объекта.

Средства диагностики и контроля (СрДК) являются основной частью систем технического диагностирования (СТД), входящих в состав любых типов современного радиоэлектронного оборудования (РЭО) ГА. Они позволяют определить эксплуатационно-технические характеристики этих систем и представляют всю необходимую информацию о техническом состоянии диагностируемых РЭС, лежащую в основе организации технического обслуживания и ремонта аппаратуры.

## **1. ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ**

### **1.1. Предпосылки использования средств диагностики и контроля**

Обеспечение безопасности и регулярности полетов воздушных судов (ВС) гражданской авиации является доминирующим показателем качества функционирования всей авиационно-транспортной системы (АТС) страны. Последняя в свою очередь может быть разделена на ряд взаимосвязанных (рис.1), но функционально самостоятельных подсистем, каждая из которых является иерархически сложной структурой, имеющей свои функциональные процессы.

Одним из основных признаков сложной системы является наличие в ней информационных потоков с последующей выработкой на основании обработки и анализа последних управляющих воздействий.

В АТС и входящих в неё эксплуатационных подсистемах основным информационным датчиком является радиоэлектронное оборудование, устанавливаемое как на борту, так и на земле и входящее во все подсистемы АТС.

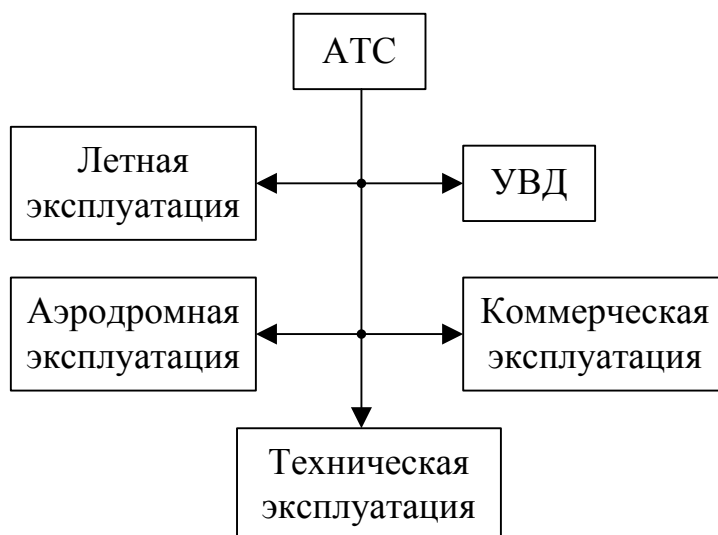


Рис.1. Структура авиационно-транспортной системы

Бортовое РЭС обеспечивает получение информации об окружающей ВС обстановке, о навигационных параметрах полета, о возможной угрозе столкновения и о координатах наземных ориентиров и аэродромов.

Наземные системы РЭО обеспечивают службу движения сведениями о координатах ВС на всех этапах полёта, об оптимальных маршрутах полета, используются в автоматизированных системах УВД.

Кроме этого существуют неавтономные наземные и бортовые радиоэлектронные системы, решающие все вышеперечисленные задачи.

Наконец, с помощью РЭС обеспечивается функционирование всех видов авиационной связи.

Многообразие задач, решаемых РЭО в системе радиообеспечения полетов, представляет большое функциональное и системотехническое разнообразие РЭС.

Однако инженеры, связанные с эксплуатацией РЭС, должны знать не только принципы функционирования этих систем, но и уметь определять уровень их работоспособности.

На решение данной проблемы нацелена дисциплина «Техническая диагностика авиационного РЭО», позволяющая решить основные задачи по выбору методов и видов технического обслуживания и технической диагностики.

Техническое обслуживание и ремонт РЭО (ТО и Р) невозможны без

средств диагностики и контроля на этапе технической эксплуатации (ТЭ). СрД и К используются на всех этапах жизненного цикла РЭО. На рис. 2 показаны все этапы жизненного цикла РЭО.

Представленный рисунок не требует дополнительных комментариев, хотя необходимо отметить, что этап эксплуатации является наиболее длительным по времени.

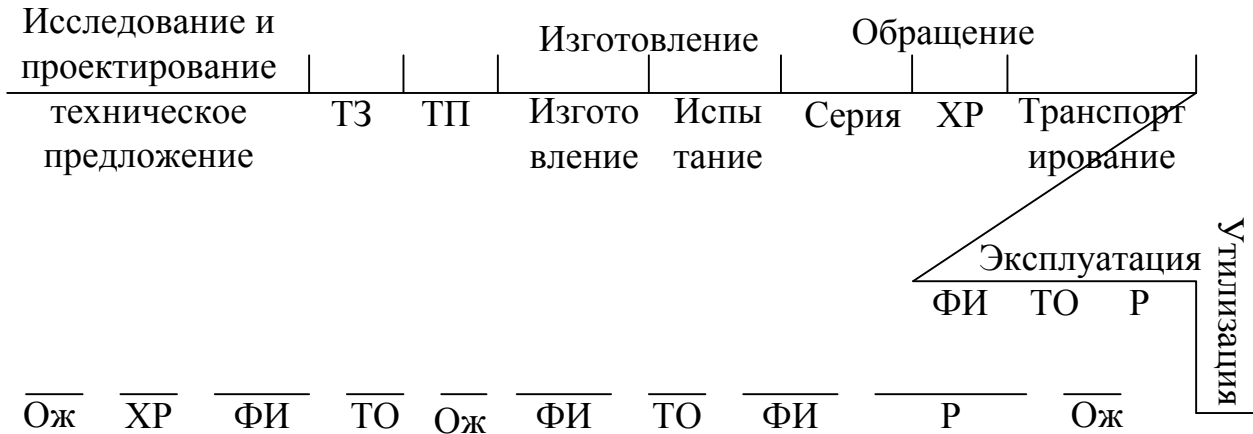


Рис. 2. Стадии жизненного цикла РЭО

ТЗ – техническое задание; ТП – технический проект; ХР – хранение; ФИ – функциональное использование; Ож – ожидание

Комплексным показателем качества функционирования РЭО на этапе эксплуатации может являться коэффициент технического использования  $K_{ТИ}$ .

$$K_{ТИ} = T_0 / (T_0 + \tau_B + \tau_{ТО}), \quad (1)$$

где:  $T_0$  – средняя наработка на отказ;  $\tau_B$  – среднее время восстановления;  $\tau_{ТО}$  – среднее время технического обслуживания.

Совокупность параметров работоспособности может быть представлена  $n$ -мерным вектором  $X_n$ , область допустимых значений которого  $A_n$ . Очевидно условие работоспособности  $X_n \subset A$ . При этом каждый из параметров, принадлежащих совокупности  $X_n = x_1, x_2, \dots, x_n$  должен находиться в соответствующих допустимых границах  $x_{ин} < x_i < x_{ив}$ , где  $x_{ин}$  и  $x_{ив}$  – допустимая нижняя и верхняя границы параметра  $x_i$ .

В области  $A_n$  можно выделить работоспособное состояние РЭО  $S_t$ . В процессе эксплуатации на РЭС действуют внешние и внутренние деградационные процессы  $D_t$ , стремящиеся перевести РЭС в предотказное состояние  $S_{по}t$ . Таким образом, можно записать  $D_t \rightarrow S_t \rightarrow S_{по}t$ . На стадии жизненного цикла РЭО в процессе ТЭ на РЭС воздействуют три процесса: деградационный, поддержки на заданном уровне функционирования, восстановления.

СрД и К активно используются при анализе второго и третьего из вышеперечисленных процессов, а в ряде случаев (особенно это касается со-

временных систем РЭО) для определения глубины первого процесса.

## 1.2. Система технического диагностирования и контроля

В процессе технического обслуживания происходит выявление всех деградиционных факторов ( $D t$ ) и организуется парирование их воздействий на исправное состояние РЭО. Можно считать, что данное парирование представляет собой некоторое управление  $Y t$ , суть которого состоит в следующей логической цепочке  $Y t \rightarrow S_{\text{по}} t \rightarrow S t$ . Для управления требуется информация о состоянии объекта управления (рис. 3). Эта информация обеспечивается в процессе технического диагностирования и контроля – определение вида технического состояния. Техническое диагностирование осуществляется системой, в состав которой входят: РЭО – объект диагностирования, средства технического диагностирования, устройства управления и контроля, генераторы стимулирующих сигналов. Реальная структура системы диагностирования включает ряд дополнительных устройств.

По своей сущности анализ системы технического диагностирования и контроля базируется на системном подходе.

Система технического диагностирования работает в соответствии с алгоритмом технической диагностики (ТД), который представляет совокупность предписаний о проведении диагностирования.

Условие проведения ТД, включающее состав диагностических параметров (ДП), границы их изменений, периодичность проверок и эксплуатационные параметры применяемых средств, определяют режим технического диагностирования и контроля.

Диагностический параметр (признак) — параметр РЭО, используемый в предписываемом технической документацией порядке для определения функционального состояния.

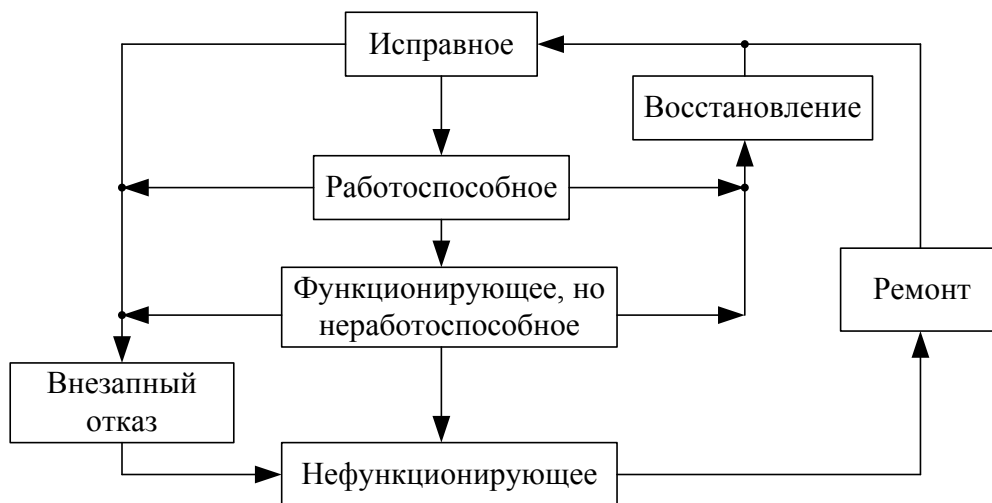


Рис.3. Граф перехода РЭС из одного состояния в другое

Функциональное состояние РЭО характеризуется в конкретный момент времени совокупностью определенных признаков, которые в свою очередь

зависят от количественных и качественных характеристик элементов радиоаппаратуры. Общее число состояний РЭО определяется числом состояний функциональных элементов и числом их связей.

В общем виде любое изделие РЭО может быть представлено полем состояний  $S(t)$ , матрицей состояний  $S_{ij}$ , а также совокупностью выходных сигналов  $U(t)$ . Поле сигналов является векторным и в нем заключена информация о техническом состоянии  $S(t)$ , следовательно, информационное поле это –  $I(S)$ . Оно существует объективно и объективно отражается в совокупности выходных сигналов, представляемых сигнальным информационным полем –  $I(U)$ , которое отражает поле  $I(S)$  с определенной погрешностью. С помощью СрД и К реализуется решение о техническом состоянии РЭО –  $S^*(t)$ .

Процесс диагностирования и контроля осуществляется на основе непрерывного или периодического контроля, хотя само РЭО из состояния  $S(t)$  переходит в состояние  $S(t + \Delta t)$ .

Алгоритм процесса диагностики и контроля описывается информационной цепью  $S_1(t) \rightarrow I(S_1) \rightarrow I(U_1) \rightarrow I^*(U_1) \rightarrow I^*(S_1) \rightarrow S_2$ .

### 1.3. Диагностические модели

Диагностические модели (ДМ) представляют собой формализованные описания объектов и процессов диагностирования, которые лежат в основе построения алгоритмов диагностирования РЭО. ДМ могут задаваться в явном или неявном виде и тесно связаны как со структурой РЭО, так и принципами представления взаимосвязей между состояниями объекта диагностирования (ОД).

Структурная, функциональная и принципиальная схемы РЭО сами по себе являются его моделями. На их основании, при возможности, могут быть получены все интересующие нас диагностические параметры, хотя зачастую это является исключительно сложной задачей.

#### 1.3.1. Аналитические модели

Данными моделями являются различные функции, описывающие взаимосвязь внешних измеряемых параметров и внутренних параметров элементов РЭО вида  $U_{\text{вых}} = \Phi(A, t), U_{\text{вх}}(t)$ .

Одним из распространенных описаний РЭО является передаточная функция в операторной форме вида:

$$K(p) = \frac{a_k p^k + a_{k-1} p^{k-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_k p^k + b_{k-1} p^{k-1} + \dots + b_1 p + b_0}, \quad (2)$$

которая имеет  $d$  вещественных  $\gamma_i$  и  $2f$  комплексных  $a_i + \omega_i$  полюсов. Переходная характеристика такого устройства представляется уравнением:

$$U(t) = A_0 + \sum_{i=1}^f A_i e^{-a_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) + \sum_{i=1}^d D e^{-\gamma_i t}, \quad (3)$$

которое является суммой колебательных и апериодических составляющих общим числом  $l = d + f$ .

Для аналитического решения используют упрощенную функцию  $K_1(p)$ , являющуюся диагностической моделью:

$$K_1(p) = \frac{a_{n-1}p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_1p + a_0}{p^n + b_{n-1}p^{n-1} + b_{n-2}p^{n-2} + \dots + b_1p + b_0}, \quad (4)$$

Решение данного уравнения находят, вычисляя по известным соотношениям коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$ .

Также используется функция чувствительности, с помощью которой вычисляются допуски на изменение параметров и правила их регулировки.

Чувствительность характеристик цепи  $Y = Y(j_1, j_2, \dots, j_n)$  определяется по формуле:

$$S_i = \frac{\partial Y}{\partial \xi_i} = S_i(y, \xi_i). \quad (5)$$

Отклонение параметров цепи при  $\xi_i = \xi_{i0} + \Delta \xi_i$ :

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n S_i \Delta \xi_i. \quad (6)$$

Относительная чувствительность цепи  $Y$  к изменению параметра на величину  $\Delta \xi_i$  определяется выражением:

$$S_{0i} = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln \xi_i} = \frac{\xi_i}{Y} S_i = S_{0i}(Y, \xi_i), \quad (7)$$

при этом величина относительного отклонения

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sum_{i=1}^n S_{0i} \left( \frac{\Delta \xi_i}{\xi_i} \right). \quad (8)$$

Для широкого класса РЭО, описываемого дифференциальными уравнениями, диагностическая модель может быть представлена в следующей форме

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{L} \mathbf{X} + \mathbf{R}, \quad (9)$$

где:  $\mathbf{X}$  –  $n$ -мерный вектор,

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix},$$

$\mathbf{L}$  – оператор перевода системы из одного состояния в другое.

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nn} \end{pmatrix},$$

где:  $l_{ij}$  — коэффициенты преобразования,  $\mathbf{R} t$  —  $n$ -мерный вектор возмущений

$$\mathbf{R} t = \begin{pmatrix} r_1 & t \\ r_2 & t \\ \dots & \dots \\ r_n & t \end{pmatrix}.$$

Если  $\mathbf{X}$  характеризует исходное состояние, то справедливо, что преобразованный оператор:

$$\mathbf{X}_{\text{пр}} = \mathbf{LX}. \quad (10)$$

### 1.3.2. Графоаналитические модели

В случае описания объекта системой линейных алгебраических уравнений эту систему можно представить в виде функции-диаграммы прохождения сигналов.

Не вдаваясь в физическую сущность переменных и связей в ОД, можно получить диагностическое обеспечение объекта.

Для построения диаграммы прохождения каждой переменной  $X_i$  строим узел. Переменная (сигнал) равна сумме входящих сигналов, а каждый из них — произведению оператора входящей ветви на переменную (сигнал) узла, из которого ветвь выходит, то есть

$$x_k = \sum x_i T_{ik}, \quad (11)$$

где  $T_{ik}$  — оператор ветви, выходящей из  $i$ -го узла и входящей в  $k$ -й узел. Если объект описывается системой уравнений:

$$x_1 = T_{01}x_0 + T_{31}x_3, \quad x_2 = T_{12}x_1 + T_{23}x_2, \quad x_3 = T_{32}x_3,$$

то диаграмма прохождения сигналов примет вид рис. 4.

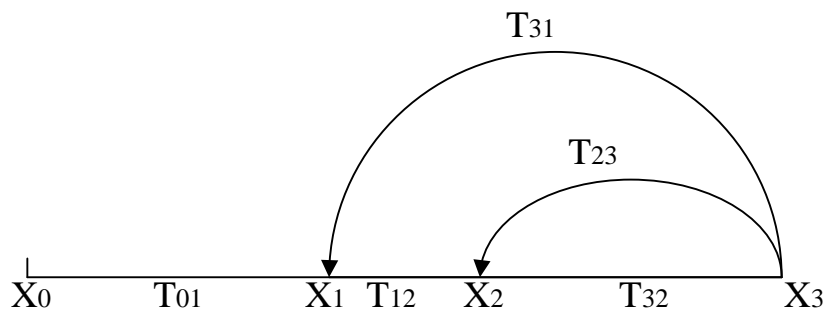


Рис. 4. Диаграмма прохождения сигналов

В ряде случаев на практике технический объект можно расчленить на несколько взаимосвязанных частей, каждая из которых имеет самостоятельное значение. При этом в качестве диагностической модели может быть

использована так называемая функциональная модель, которая представляет собой графическое изображение объекта (рис. 5), строящееся по следующим правилам:

- 1) функциональный элемент – логически законченный фрагмент принципиальной схемы, выполняющий определенную функцию, обозначается прямоугольником. В зависимости от глубины диагностирования функциональным элементом может выступать: отдельный блок в сложной системе; плата или функциональный узел отдельного блока; элементарная сборочная единица принципиальной схемы (R, L, C, DD, VT, VD и т.п.);
- 2) количество входов соответствует числу воздействий, которые необходимо приложить, чтобы получить реакцию на выходе элемента. Функциональный элемент модели может иметь сколько угодно входных сигналов и только один выходной. Связи между элементами указаны линиями со стрелками, обозначающими направление прохождения сигнала. В случае, если на функциональной схеме системы функциональный элемент имеет два и более выхода, то его необходимо разделить на взаимосвязанные блоки, каждый из которых будет соответствовать одному из выходов;
- 3) внешние входные воздействия принимают только номинальные значения (т.е. перед началом диагностирования в зависимости от глубины поиска места отказа необходимо проверить: питание сложного РЭО, все внешние входные воздействия блока или платы);
- 4) в каждом функциональном элементе модели известны номинальные значения входных и выходных сигналов, их функциональная зависимость, а также способ контроля;
- 5) в случае, когда выходной сигнал  $i$ -го элемента (блока) является входным сигналом для  $i+1$  элемента (блока) – номинальные значения и допуски на эти сигналы совпадают. Если хотя бы на один из входов функционального элемента подано недопустимое воздействие, то выходная реакция функционального элемента должна быть тоже недопустимой;

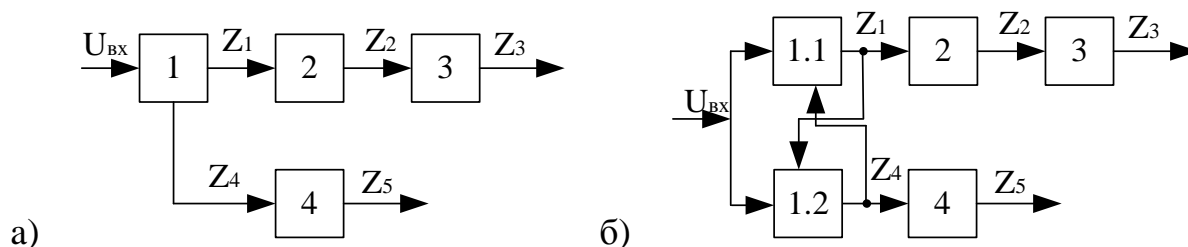


Рис. 5. Функциональная схема РЭО (а) и его функционально-диагностическая модель (ФДМ) (б)

- б) состояние функционального элемента оценивается «1», если при подаче всех допустимых входов на выходе функционального элемента возникает допустимая реакция. Если же при подаче всех допустимых входов реакция функционального элемента окажется недопустимой, то его состояние оценивается «0»;
- 7) цепи и связи между функциональными элементами модели надежны.



Вероятность появления двух отказов ничтожно мала (однородный поток отказов). В этом случае ориентированный граф строится непосредственно по функциональной схеме РЭО. В виде ориентированного графа, дуги (ребра) которого снабжены стрелками, может быть представлено любое РЭО. Ориентированный граф обозначают символами  $G(X, V)$ , где  $X = x_1, \dots, x_n$  и  $V = v_1, \dots, v_m$  соответственно множество вершин и дуг. С понятием ориентированный граф связан термин «отображение» (рис. 6). Отображение показывает, каким образом вершина  $x_i$  отображается в других вершинах.

Граф (рис. 6) характеризуется отображением следующего вида:

$$\Gamma x_1 = x_2, x_3, \quad \Gamma x_2 = x_4, x_5, \quad \Gamma x_3 = x_5, \quad \Gamma x_4 = x_5, \quad \Gamma x_5 = 0.$$

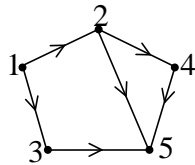


Рис. 6. Структура фиксированного графа

Применение изображения функциональных схем в ориентированных графах позволяет представить схему, как и любой граф, в виде матрицы, так называемой «матрицы смежности».

Матрица смежности графа  $G$ , состоящего из  $n$  вершин, – это квадратичная матрица  $A = \|a_{ij}\|$  с  $n$  строками и  $n$  столбцами; ее общий элемент  $a_{ij} = 1$ , когда между вершинами  $x_i$  и  $x_j$  есть связь и  $a_{ij} = 0$ , когда вершины  $x_i$  и  $x_j$  – не соединены дугами. Для графа на рис. 6 матрица смежности определяется выражением

$$A = \left\| \begin{array}{ccccc|c} j = 1, 2, 3, 4, 5, & i & & & & \\ \hline 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{array} \right. \quad (12)$$

Одним из видов графоаналитических моделей является матрица состояний (таблица состояний, таблица неисправностей), строящаяся на базе ФДМ. Номер столбца соответствует номеру вида технического состояния ОД, номер строки — элементарной проверке  $U_j$  на выходе блока  $j$ .

При составлении таблицы логическим путем оценивают результат проверки  $U_i$  для состояния вида  $j$ . Если результат проверки – положительный, в элемент таблицы  $i, j$  записывается (1), в противном случае – (0).

В качестве примера приведены типовая схема тракта синхронизации РЛС (рис. 7а), ее ФДМ (рис. 7б), ориентированный граф (рис. 7в). Из сопоставления

схемы и ФДМ следует, что модель отличается тем, что все ее элементы имеют по одному выходу, а тракты обратной связи разомкнуты. На рис.7а Сх – синхронизатор; ПРД – передатчик; ВВ – высоковольтный выпрямитель; ВТ – вращающийся трансформатор; ГМ – генератор меток; ГПИ – генератор прямоугольных импульсов; ГЛИН – генератор линейно-изменяющегося напряжения; ГПТ – генератор пилообразного тока. Матрица состояний (рис. 7г) построена по следующему принципу:  $S_p$  – строка, соответствующая работоспособному состоянию;  $S_i$  – строка соответствующая состоянию, в котором отказал первый блок ФДМ,  $S_2$  – состояние отказа 2-го блока ФДМ и т.д. Столбцы  $u_1, u_2 \dots u_n$  соответствуют проверкам состояния блока 1, блока 2, ... блока n. Элемент матрицы вида  $A_{ij}$  соответствует результатам проверки на выходе j-го блока ФДМ в случае, когда схема находится в i-м состоянии.

### 1.3.3. Информационная диагностическая модель

С информационной точки зрения объект ТД (ОТД) – датчик диагностических параметров, имеющих среднеквадратическое значение  $\sigma_x$ . Измерительный прибор СТД характеризуется погрешностью  $\sigma_n$  и полосой пропускания W. Количество информации, полученной при диагностировании за время T:

$$I = WT \log_2 \frac{\sigma_x^2 + \sigma_n^2}{\sigma_n^2}.$$

С учетом того, что  $\sigma_x^2 \gg \sigma_n^2$ :  $I = 2WT \log_2 \sigma_x / \sigma_n$ .

Функционирование СТД ограничено во времени возможностью отказа. Ее среднее время безотказной работы в течение периода T:

$$T_1 = T_0 (1 - p), \quad (13)$$

где:  $T_0 = 1/\lambda$  – средняя наработка на отказ;  $\lambda$  – параметр потока отказов,  $p = \exp -\lambda t$  – вероятность безотказной работы. При возможности отказа СТД время его работы сокращается, что адекватно уменьшению информации о состоянии ОД. Информационные потери определяются следующим соотношением:

$$\Delta I_1 = I - I_1 = 2W (T - T_0 (1 - p)) \log_2 \sigma_x / \sigma_n.$$

При работе СТД с погрешностью  $I_2 = 2WT \log_2 \sigma_x / \sigma_3$ .

Приравнивая выражения  $\Delta I_1 = \Delta I_2$  и учитывая, что потери информации в СТД с эквивалентной погрешностью  $\sigma_3$  равны  $\Delta I_2 = I - I_2 = 2WT \log_2 \sigma_3 / \sigma_n$ , получаем  $\log_2 \sigma_3 / \sigma_n = 1 - (T - T_0 (1 - p)) \log_2 \sigma_x / \sigma_n$ , из которого определяется величина:

$$\sigma_3 = \sigma_n \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_n} \right)^{1 - T_0 (1 - p) / T}.$$

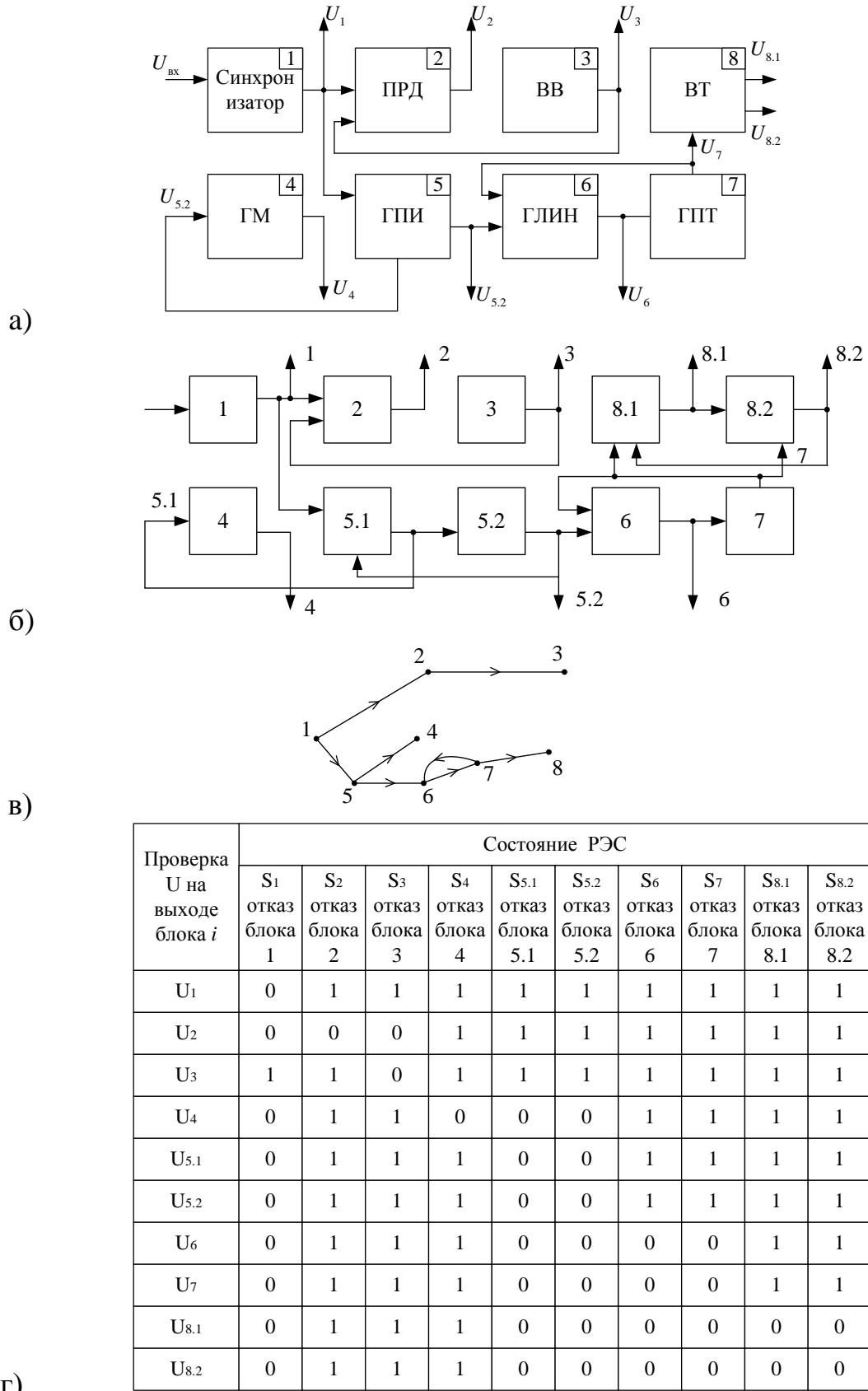


Рис. 7. Типовая схема тракта синхронизации РЛС (а), ее ФДМ (б), ориентированный граф (в), матрица состояния (г)

Если вероятность отказа на временном интервале  $T$  достаточно мала, то

$$\left. \begin{aligned} p &= \exp -\lambda T \cong 1 - T/T_0 + T^2/2T_0^2 \\ \sigma_3 &= \sigma_x^{\lambda T/2} \sigma_{\Pi}^{(1-\lambda T/2)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Из полученных выражений для погрешности  $\sigma_3$  явствует взаимосвязь между погрешностью прибора  $\sigma_{\Pi}$ , среднеквадратичным значением параметра  $\sigma_x$ , безотказностью  $\lambda$ , временем функционирования системы.

Неопределенность состояния объекта  $S$  характеризуется выражением для энтропии:

$$H S = \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i = \log_2 N \text{ при } p_i = 1/N. \quad (15)$$

Уменьшение энтропии  $H S$  в процессе проведения контроля характеризует прирост информации о состоянии РЭО. Представляемая информация является максимальной:

$$I U_k, S = H S - H U_k, S \rightarrow I_{\max}.$$

Поскольку конечной целью управления состоянием является его изменение от величины  $P_0$  до величины  $P_i$ , а возможности, то есть уровень управляемости определяется информацией от СТД, можно представить СТД источником некоторого информационного напряжения:

$$\Delta H = H_0 - H_1 = -\log_2 P_1/P_0.$$

Если известны зависимости выходной величины сигнала объекта от различных воздействий, то в качестве ДМ можно рассматривать зависимость выходной переменной объекта от входной, представленной в виде:

$$\bar{Y} = F \bar{X} + Z \bar{X},$$

где:  $\bar{Y}$  – функция выходных переменных;  $\bar{X}$  — вектор входных переменных;  $F \bar{X}$  – усредненная входная функция ОД;  $Z \bar{X}$  – вероятностная функция, учитывающая производственный разброс.

Непосредственный вид функции  $\bar{Y}$  может быть установлен с помощью методов теории планирования эксперимента и представляет собой полиномиальные уравнения. Коэффициенты полиномов определяются методами регрессионного анализа.

Алгоритм действий при построении модели следующий:

1) подготавливается исходная информация об объекте в виде зависимостей, представленных на рис.8;

2) выбираются границы изменения факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;

3) выбирают центр плана  $\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \dots, \overset{\circ}{x}_n$ ;

4) выбираются единицы варьирования  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ ;

5) составляется матрица планирования эксперимента (табл.1) типа

$$N = 2^{n+1} + 2n + 1;$$

б) по семейству графических зависимостей (рис. 9) определяются значения функций отклика  $y$  для всех сочетаний уровней в матрице планирования изменений факторов  $x$ ;

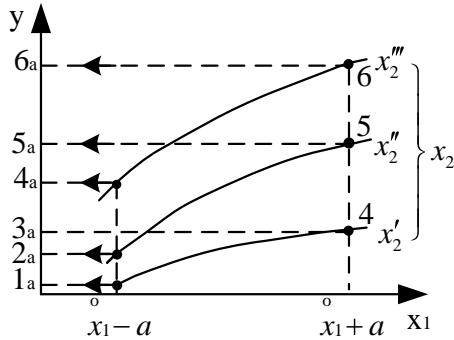


Рис. 8. Выходная функция ОД

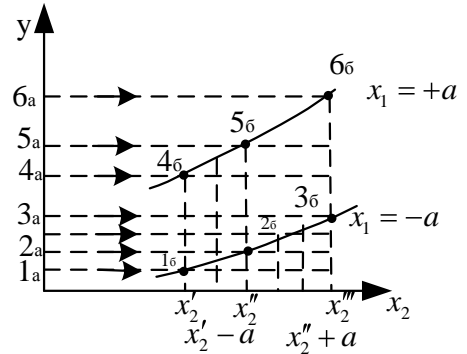


Рис. 9. Значения функции отклика  
Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

N	$x_1$	$x_2$	$y$
1	$x_1 - a$	$x_2 - a$	$y_1$
2	$x_1 + a$	$x_2 - a$	$y_2$
3	$x_1 - a$	$x_2 + a$	$y_3$

7) вычисляются коэффициенты в уравнении регрессии вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i + \sum_{i<j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i^2 + \sum_{i<j<k}^n b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^n b_{iii} x_i^3 \quad (16)$$

с помощью следующих соотношений:

$$b_0 = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} y_n}{2^{n+1} + 2n + 1} - \alpha \sum_{n=1}^N b_{ii};$$

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} y_n}{2^{n+1} a^2 + c^2 + 2d} - b_{iii}, \quad \forall_i = \overline{1, n};$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} y_{jn} y_n}{2^{n+1} a^4 + c^4}, \quad i < j, \quad \forall_j = \overline{2, n};$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in}^2 - \alpha y_n}{2^n \left[ a^2 - \alpha^2 + c^2 + \alpha^2 \right] - 2 d^2 - \alpha^2 + 2n - 1 d^2};$$

$$b_{ijk} = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} y_{jn} x_{kn} y_n}{2^n a^6 + c^6}, i < j < k, \forall_k = \overline{3, n};$$

$$b_{iii} = \frac{\sum_{n=1}^N \left[ x_{in}^2 - \beta x_{in} \right] y_n}{2^n \left[ a^2 - \alpha^2 a^2 \right] + c^2 + \alpha^2 c^2 + 2 d^2 - \beta^2 d^2},$$

где  $x_i, x_j, x_k$  берутся из матрицы планирования и могут принимать значения  $\pm a, \pm c, \pm d, 0$ , а значения  $y$  также берутся из этой матрицы;

8) проверяем на точность аппроксимации исходные графические зависимости.

## 2. КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЭО В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

### 2.1. Выбор допусков на диагностические параметры

Суждение о характере функционального состояния РЭС, РЭУ или элемента схемы выносится только после того, как зафиксирован выход ДП за пределы допуска  $U_{дн} > U; U > U_{дв}$ .

Большинство РЭС ГА характеризуются такими параметрами, которые должны находиться в пределах своих допускаемых значений.

Допуски на параметры РЭС (ДП) подразделяются на производственные  $\delta_{п}$ , эксплуатационные  $\delta_{э}$  и ремонтные  $\delta_{р}$ .

Производственный допуск устанавливается техническими условиями или нормативно-техническими документами.

Эксплуатационные допуски устанавливаются системой эксплуатационно-технической документации, а также технологическими указаниями по выполнению регламентных работ на образцах РЭО. Границы эксплуатационных допусков зачастую превосходят значения  $\delta_{п}$ , а число регламентируемых параметров меньше, чем при производстве РЭО.

Ремонтные допуски определяются в ремонтной документации или в производственно-технологической документации.

Установление допусков взаимосвязано с требованиями, предъявляемыми к тактическим характеристикам использования РЭО, а также с вопросами выбора точностных характеристик СТД.

В свою очередь ДП, на которые устанавливаются допуски, могут быть разделены на две группы:  $\Pi_1$  и  $\Pi_{II}$ . К группе  $\Pi_1$  относятся ДП, которые одновременно являются показателями функционального использования и могут

быть непосредственно измерены. Допуски на эти ДП устанавливаются, исходя из целевого назначения РЭО.

К группе  $\Pi_{II}$  относятся такие показатели, которые также определяют параметры функционального использования, но их значения являются функцией внутренних параметров  $U_i = F(a_1, \dots, a_n)$ . При этом анализ точностных значений  $U_i$  производится только через параметры  $F$ .

Допуски на параметры первой группы устанавливаются, исходя из соображений тактических или технологических возможностей производства РЭС и, в значительной степени, определяются требованиями иерархически старших систем – самолетовождения или УВД. Остановимся на ДП второй группы.

Если функциональная зависимость  $U$  от параметров  $F$  известна и известны характеристики разброса  $F(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , то поле рассеяния  $U$  определяется следующим выражением:

$$L_U = \frac{1}{K_U} \sqrt{\sum_i^n \partial U / \partial a_i K_L^2 L_i^2}, \quad (17)$$

где  $\partial U / \partial a_i = \partial F(a_1, \dots, a_n) / \partial a_i$  – частная производная ДП при номинальных значениях  $a_i = a_{i0}$ ;  $L = (a_B - a_H) / 2$  – половина поля рассеяния;  $a_B$  и  $a_H$  – наибольшее и наименьшее значения параметра  $a$  соответственно;  $K_i$  – коэффициент относительного рассеивания;  $K = \sigma / L \varepsilon_3$ ;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение (СКО);  $\varepsilon_3$  – относительное СКО для «эталонного» распределения (зачастую принимают  $\varepsilon_3 = 1/3$ , что соответствует нормальному распределению и правилу  $\pm 3\sigma$ , то есть  $L = 3\sigma$ ).

Координата середины поля рассеивания параметра  $U$  относительно его номинального значения  $U_0$  определяется выражением:

$$Y_{U.c} = \sum_i^n \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right) Y_{i.c} + \alpha_i L_i, \quad (18)$$

где:  $\alpha_i = (m_U - U_c) / L_U = [m_U - U_0 - U_c - U_0] / L_U$ ;  $m_U$  – математическое ожидание параметра;  $U_i$  – середина поля рассеивания;  $U_c = (U_B + U_M) / 2$ .

Приведенные соотношения верны при следующих ограничениях: параметры  $a_i$  независимы, а их законы распределения и количество  $i = \overline{1, n}$  таковы, что  $U$  оказывается распределенным по гауссовскому закону. Отклонения значений  $U$  являются множественными функциями значений  $a_i$ . Коэффициенты влияния  $\partial U / \partial a_i$  остаются постоянными в пределах поля рассеивания  $L_i$ .

В действительности, если  $U = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , то его предельная величина отклонения:  $\delta U_{\text{пр}} = d[f(a_1, a_2, \dots, a_n)]$  или  $\delta U_{\text{пр}} = \alpha_1 \delta a_1 + \alpha_2 \delta a_2 + \dots + \alpha_n \delta a_n =$

$= \alpha_1 d_1 a_1 / a_1 + \alpha_2 d_2 a_2 / a_2 + \dots + \alpha_n d_n a_n / a_n$ , где:  $\delta a_i$  – относительные ошибки аргументов;  $\alpha_i$  – коэффициенты, являющиеся показателями различных аргументов.

Если ошибки аргументов известны, то можно найти предельную ошибку.

Для исключения неопределенности обычно принимают  $\alpha_1 \delta a_1 = \alpha_2 \delta a_2 = \dots = \alpha_n \delta a_n = \delta U_{\text{пр}} / n$ , откуда относительная ошибка аргумента:

$$\delta a_j = \pm \delta U_{\text{пр}} / n a_j. \quad (19)$$

## 2.2. Поиск места отказа в системах РЭС

В общем случае задача определения поиска места отказа (ПМО) может рассматриваться как ряд частных взаимосвязанных задач:

- а) фиксация отказа;
- б) локализация отказа;
- в) восстановление отказавшего элемента (узла);
- г) контроль параметров сменной единицы;
- д) контроль за нормами технических параметров (НТП) РЭО после установления восстановленного элемента (узла);
- е) установка РЭО;
- ж) проведение работ согласно регламенту ТО.

Собственно задача ПМО формулируется следующим образом: найти определенную последовательность выполнения логических и измерительных операций, которые установят, в каком  $S_i$  из множества  $S$  состояний находится РЭО в кратчайшие или заданные сроки при минимальных затратах.

Одним из наиболее простейших методов является метод определения отказов по характерным признакам, использующий специальные таблицы, содержащие информацию о возможных отказах и сопутствующих им признаков и проявлений.

### 2.2.1. Метод поиска места отказа путем поэлементной проверки

Метод используется тогда, когда об изделии РЭО имеется минимальная информация. При этом проверяется работоспособность каждого из  $m$  элементов последовательно. Среднее число элементов

$$m_{\text{ср}} = m + 1 / 2. \quad (20)$$

Среднее время проверок  $t_{\text{ср}} = t_m m + 1 / 2$ . Часто для РЭО алгоритм ПМО, реализующий данный метод, выглядит как проверка работоспособности узлов (элементов) РЭО по принципу «с выхода на вход».

### 2.2.2. Метод поиска отказа по критерию «время-безотказность»

На основании анализа статистического материала по надежности функционирования РЭО формируют алгоритм ПМО. Если проверенный элемент оказывается работоспособным (исправным), то приступают к проверке следующего. Если известны вероятности отказов  $Q_i$  всех диагностируемых блоков РЭО, а также  $\tau_{di}$  – среднее время диагностирования каждого блока в



процессе ПМО, то математическое ожидание времени ПМО для произвольной последовательности проверок имеет вид:

$$\tau_{дс1} = Q_1 \cdot 0 \cdot \tau_{д1} + Q_2 \cdot 0 \cdot \tau_{д1} + \tau_{д2} + \dots + Q_n \cdot 0 \cdot \tau_{д1} + \tau_{д2} + \dots + \tau_{дn}, \quad (21)$$

если изменить программу проверок, переставив, например, местами первую и вторую, то

$$\tau_{дс2} = Q_2 \cdot 0 \cdot \tau_{д2} + Q_1 \cdot 0 \cdot \tau_{д1} + \tau_{д2} + \dots + Q_n \cdot 0 \cdot \tau_{д1} + \tau_{д2} + \dots + \tau_{дn},$$

$$\tau_{дс1} - \tau_{дс2} = Q_2 \cdot 0 \cdot \tau_{д1} - Q_1 \cdot 0 \cdot \tau_{д2}.$$

Если  $Q_1 \cdot 0 / \tau_{д1} > Q_2 \cdot 0 / \tau_{д2}$ , то первая программа эффективней второй, то есть  $\tau_{дс1} < \tau_{дс2}$ . Отсюда получаем принцип построения алгоритма ПМО: для каждого узла находим отношение  $Q_i \cdot 0 / \tau_{ди} = \alpha_i$  и строим алгоритм по правилу:

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \dots > \alpha_n.$$

### 2.2.3. Метод ветвей и границ

Программе диагностирования может соответствовать бинарное дерево проверок  $G = \{P_k, U, S, V\}$ , где  $S$  – множество висячих вершин в дереве;  $P_k$  – множество внутренних вершин;  $V$  – множество дуг дерева.

Средняя стоимость диагностирования:

$$C_B = \sum_{i=1}^n C_i \left( \sum_{S_j \in S_i} Q_j \right), \quad (22)$$

где  $S_i \in S_j$  – множество подлежащих диагностированию состояний РЭО по программе, представленной деревом  $B_i \in B$  с начальной вершиной  $\pi_i$ .

Для ОД задается матрица состояний, содержащая  $\omega$  проверок, каждая из которых может включаться в программу диагностирования. Программа может начинаться с любой проверки  $U_i$ ,  $i = \overline{1, \omega}$ . Эта проверка будет соответствовать корням дерева  $B$  и называется фиксированной. Проверка  $U_i$  разбивает  $S$  на два несовместимых подмножества  $S_{i1}$  и  $S_{i2}$ , которые соответствуют отрицательным и положительным результатам контроля. Значения средних стоимостей проверок  $C_{B_{i0}}$  и  $C_{B_{i1}}$  неизвестны, поэтому искомые решения заменяются нижними границами  $CM_{S_{i0}}$  и  $CM_{S_{i1}}$ . Будем иметь:

$$CM_{U_i, S} = C_i \sum_{S_t \in S} Q_t + CM_{S_{i0}} + CM_{S_{i1}}, \quad (23)$$

где  $CM_{U_i, S}$  – нижняя граница средней стоимости диагностики, начинающейся с фиксированной программы  $U_i$ .

Для первого шага алгоритма выбирается та, которая имеет наименьшую нижнюю границу.

На втором шаге для каждого множества  $S_{i0}$  и  $S_{i1}$  и множества различных пар для фиксированных проверок ( $U_j$  для  $S_{i0}$  и  $U_1$  для  $S_{i1}$ ) вновь определяется нижняя граница по формулам:

$$CM U_j, S_{i0} = C_j \sum_{S_t \in S_{i0}} Q_t + CM S_{j00} + CM S_{j01},$$

$$CM U_1, S_{i1} = C_1 \sum_{S_t \in S_{i1}} Q_t + CM S_{110} + CM S_{111},$$

где индексы 00, 01, 10 и 11 соответственно означают разбиения  $S_0 = S_{00} \cup S_{01}$  и  $S_1 = S_{10} \cup S_{11}$ . Нижняя граница средней стоимости программы диагностирования  $CM U_i, U_j, U_1, S$  для фиксированных проверок, выбранных на первых двух шагах алгоритма, определяется выражением:

$$CM U_i, U_j, U_1, S = C_i \sum_{S_t \in S} Q_t + CM U_j, S_{i0} + CM U_1, S_{i1}. \quad (24)$$

Далее процедура проходит аналогично. Если средняя нижняя стоимость проверок превышает нижнюю границу стоимости любой из возможных программ первого и последующего шагов алгоритма, то процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено оптимальное решение. На рис. 10 представлено дерево решений для возможной задачи оптимизации программы методом ветвей и границ.

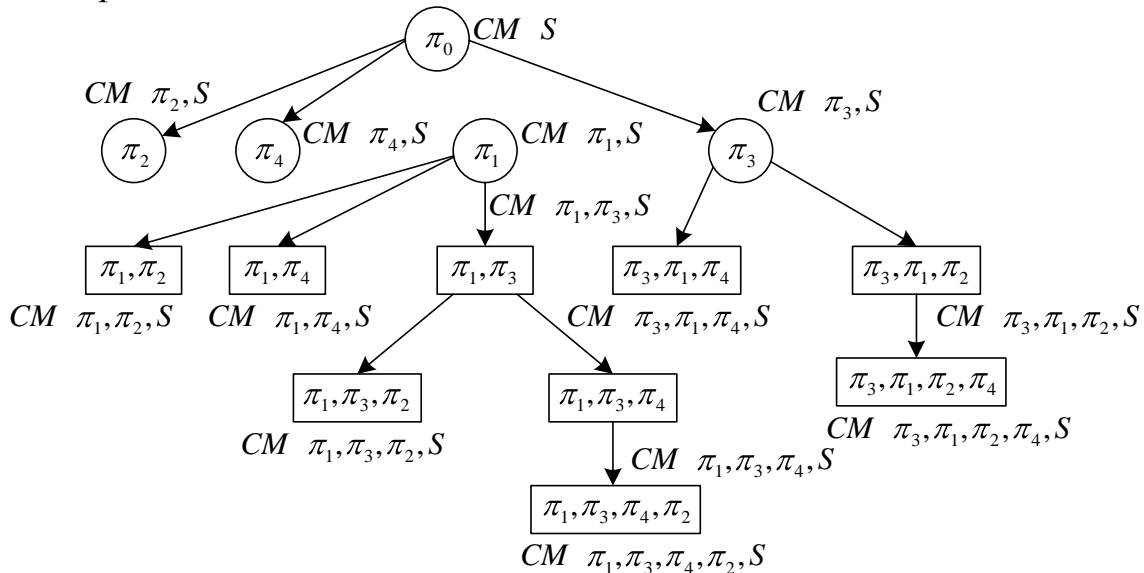


Рис.10. Дерево ПМО методом ветвей и границ

#### 2.2.4. Метод половинных разбиений

Для РЭО, имеющего последовательную (или приближенную к ней) структуру для ПМО, широко используется метод половинных разбиений (рис. 11). В схеме анализируемого РЭУ с учетом или без учета вероятности отказа производится проверка состояния оборудования в средней точке (средний узел, блок), после чего, в зависимости от результата, проверяется правая или левая часть схемы.

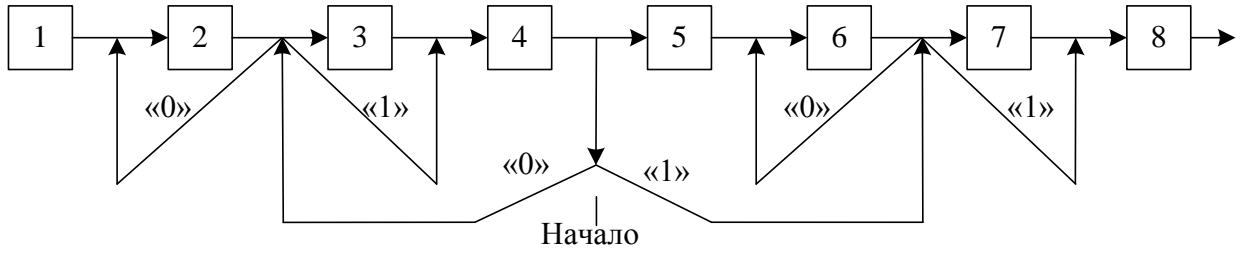


Рис. 11. Метод половинных разбиений

### 2.2.5. Оптимизация алгоритма ПМО на основе информационного подхода

Применение метода базируется на двух принципах:

- система технической диагностики и контроля – информационная система;
- в каждой проверке целевая функция отображает информацию о возможном (из поля  $S$ ) состоянии РЭО.

Поскольку отказ не локализован, то очевидно, что в каждой проверке может быть заложена информация о том, где возник отказ с вероятностью  $Q S_i$ . Каждая проверка  $U_i$  контролирует одну или несколько возможных точек, сумма вероятностей которых:

$$Q_{U_i} = \sum_{j=1}^m Q S_j, \quad (25)$$

средняя энтропия имеет смысл глубины наших знаний о состоянии контролируемого узла (элемента, блока) РЭО при  $i$ -й проверке  $H S/U_i$  и определяется соотношением:

$$H \left( \begin{matrix} S \\ U_i \end{matrix} \right) = - \left\{ Q_{U_i} \sum \frac{S U_i}{Q_{U_i}} \log_2 \frac{S U_i}{Q_{U_i}} + 1 - Q_{U_i} \sum \frac{S U_j}{Q_{U_i}} \log_2 \frac{S U_j}{Q_{U_i}} \right\}.$$

В  $i$ -й проверке заложена информация:

$$I_{U_i \rightarrow S} = H S - H \left( \begin{matrix} S \\ U_i \end{matrix} \right) = - Q_{U_i} \log_2 Q_{U_i} + 1 - Q_{U_i} \log_2 1 - Q_{U_i}. \quad (26)$$

Максимум информации о состоянии ОД содержит проверку, для которой величина:

$$\frac{dI_{U_k}}{dQ_{U_k}} = 0 = - \log_2 Q_{U_k} - \log_2 e - \log_2 1 - Q_{U_k} + \log_2 e.$$

Откуда  $Q_{U_k} = 0,5$ .

Поэтому ПМО должен начинаться с точки ФДМ, для которой имеет место соотношение:  $\sum_{j=1}^m Q S_j = 0,5$ . (27)

Отсюда следует правило построения алгоритма ПМО на основе информационного подхода. По ФДМ РЭО строится матрица состояний (состояние  $S_j$  – столбцы, проверки  $U_i$  – строки). Под каждым значением  $S_j$  указывается его численная нормированная величина  $S_j \cdot 0$ ;  $\sum Q_j \cdot 0 = 1$ .

Для каждой строки  $U_i$  вычисляется функция предпочтения:

$$W_j = \sum Q_j \cdot 0 \ll 1_j \gg - \sum Q_j \cdot 0 \ll 0_j \gg, \quad (28)$$

где:  $\sum Q_j \cdot 0 \ll 1_j \gg$  – сумма вероятностей отказа элементов, имеющих значение единица в строке состояния;  $\sum Q_j \cdot 0 \ll 0_j \gg$  – сумма вероятностей отказа элементов, имеющих значение ноль в строке состояния.

В качестве первой проверки выбирается та, для которой величина функции предпочтения  $W_j \rightarrow 0$ , то есть минимальна.

Далее проверки продолжаются по двум равноинформативным ветвям. Для результата  $U_i W_{\min} = "1"$  строится новая матрица, в которую попадают состояния  $S_{ij}$ , соответствующие единице; для этой матрицы также вычисляется значение функции предпочтения:

$$W_k = \sum Q_k \cdot 0 \ll 1_k \gg - \sum Q_k \cdot 0 \ll 0_k \gg_{\min} \quad (29)$$

и далее процедура повторяется до получения однозначного ответа по каждому элементу ветви.

Для результата проверки  $U_i W_{\min} = "0"$  также строится соответствующая матрица, в которой принимают участие состояния  $S_{ij}$  с результатом проверки равным «нулю». Для всех строк этой матрицы также вычисляется функция предпочтения по соотношению (29) и следующая проверка выбирается по  $W \rightarrow \min$ .

Матрица состояний и ее разветвления при ПМО в схеме тракта синхронизации РЛС (рис. 7), представлены на рис. 12.

При необходимости данный алгоритм может быть построен с учетом стоимости диагностирования.

Функция предпочтения при учете стоимости  $C_i$  имеет следующий вид:

$$W_{jc} = C_i \sum Q_j \cdot 0 \ll 1_j \gg - \sum Q_j \cdot 0 \ll 0_j \gg_{\min}, \quad (30)$$

а процедура построения алгоритма ПМО остается одной и той же.

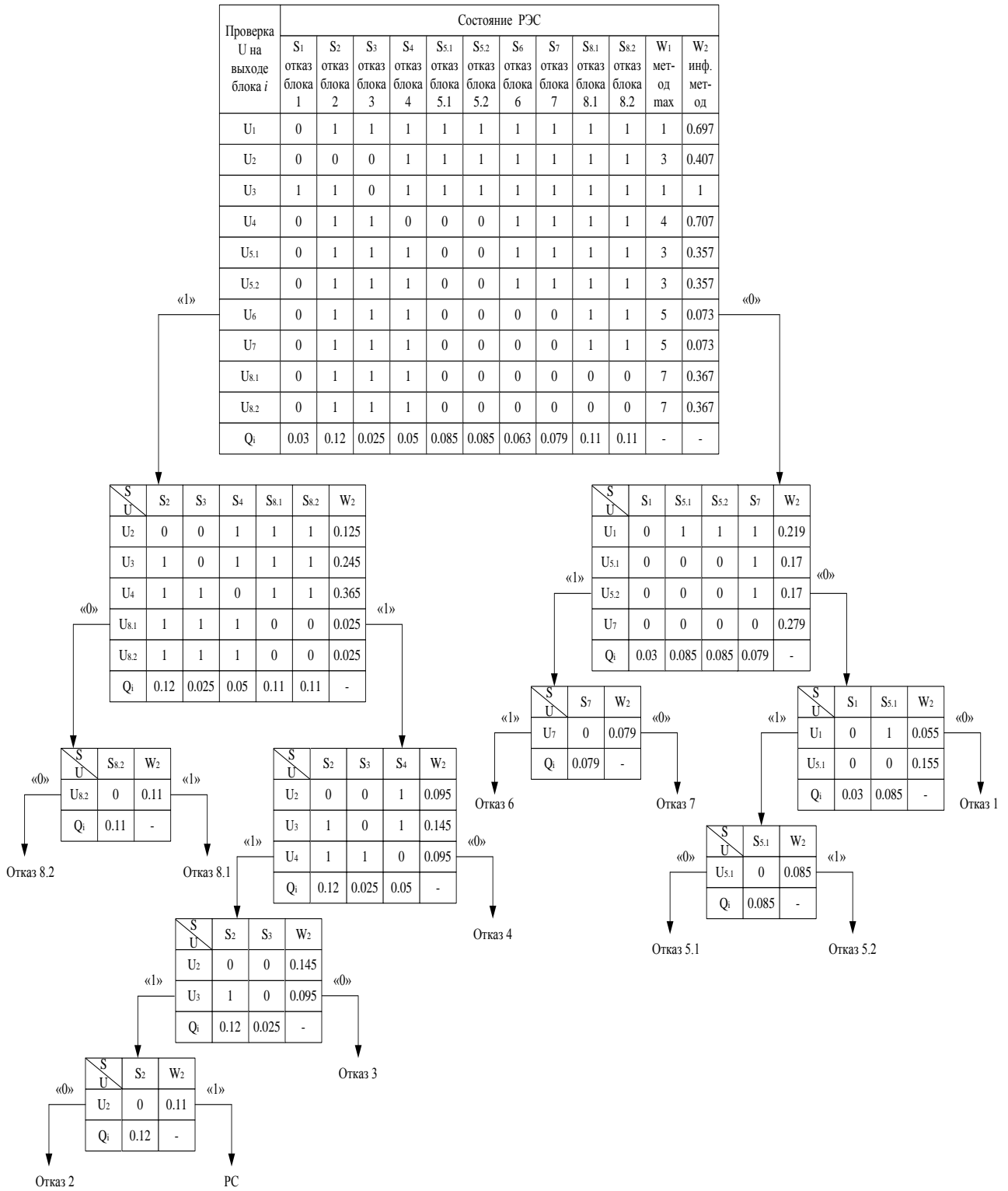


Рис. 12. Синтез алгоритма ПМО на базе информационной модели

### 2.3. Прогнозирование состояния РЭО

Прогнозирование технического состояния РЭО означает предсказание его будущего состояния на основе изучения и учета тех факторов, от которых оно зависит и которые ему предшествуют.

В процессе эксплуатации прогнозирование позволяет с определенной степенью точности найти: время наступления предстоящего отказа, узлы аппаратуры, в которых наиболее вероятно появление отказа, характер и число отказов в будущем.

Дополнительная информация о состоянии РЭО, например, о производных совокупности ДП  $U_p, U_1, U_2, \dots, U_n$ ,  $U'_p, U'_1, U'_2, \dots, U'_n$  по времени, о тенденциях в изменении ДП за наблюдаемый интервал, позволяет выявить более глубокие закономерности, чем используемые в теории надежности законы распределения времени наработки между отказами.

Количественный прогноз состояния РЭО зачастую позволяет определить стратегию ТЭ. Однако в силу случайного характера процессов, протекающих в РЭС, и условий функционирования, прогноз подчиняется случайным закономерностям. Необходимо отметить, что практически всегда прогнозирующие оценки имеют детерминированную и случайную составляющие, что и определяет совокупность ДП в будущем:

$$U(t + T_{\text{пр}}) = U_{\text{дет}}(t + T_{\text{пр}}) + U_{\text{сл}}(t + T_{\text{пр}}).$$

Результаты прогнозирования позволяют:

- определять периодичность диагностирования;
- проводить предупредительные замены исправных элементов;
- определять и обосновывать объемы ЗИП;
- оптимизировать (корректировать) алгоритмы ПМО;
- организовывать рациональные режимы хранения ЗИП;
- совершенствовать стратегии ТО;
- правильно планировать выпуск изделий РЭО и СрДиК.

В общем виде алгоритм прогнозирования технического состояния может быть представлен в виде следующей последовательности операций:

- определение предшествующего состояния РЭС:  $S(t - T_{\text{Н}})$ , где  $T_{\text{Н}}$  – интервал наблюдения;
- определение прошлого состояния РЭС:  $S(t - T_{\text{из}})$ , где  $T_{\text{из}}$  – интервал изучения;  $T_{\text{из}} \gg T_{\text{Н}}$ ;
- техническое диагностирование и контроль в данный момент времени  $t_0 - S(t)$ ;
- обработка результатов по данным  $S(t - T_{\text{из}})$ ,  $S(t - T_{\text{Н}})$ ,  $S(t_0)$  и определение закономерности изменения состояния (отметим, что современные вычислительные средства позволяют в кратчайшие сроки по полученным данным выработать конкретные рекомендации по ТО конкретных РЭС);
- прогнозирующий расчет и определение  $S(t + T_{\text{пр}})$  ..

Иногда прогнозирование называют прогнозирующим контролем.

При существующем многообразии подходов и методов осуществления прогнозирования, предопределяемых физическими процессами изменения

состояния элементов, узлов и блоков РЭС, можно указать основные принципы получения результатов прогноза, которые будут объединять целые группы возможных методов прогнозирования:

1) результат прогноза получают в той же размерности, что и контролируемые параметры, то есть прогнозирование изменения состояния ОД (ДП) имеет своей целью получить величину контролируемого параметра, характеризующего временное изменение процесса;

2) результат прогноза определяется как вероятность выхода (невыхода) характеристик контролируемого процесса за определенные пределы;

3) в результате прогноза контролируемый процесс (ОД) может быть отнесен к тому или иному классу заранее охарактеризованных процессов (параметров функционального использования ОД РЭС ГА) по критерию работоспособности или долговечности,

### 2.3.1. Аналитическое прогнозирование

Рассмотрим задачу прогнозирования, подходя к ней с позиций сформулированного выше первого направления. Пусть контролируемый процесс, характеризующий состояние РЭО–ОД представлен в виде многомерной векторной функции  $\vec{\xi} t = \xi_1 t, \xi_2 t, \dots, \xi_n t$  наблюдаемой дискретно или непрерывно в период времени от  $t_0 = 0$  до  $t_n$  в области  $T_1$  вследствие чего известны значения этой функции  $\vec{\xi} t_0, \vec{\xi} t_1, \dots, \vec{\xi} t_i, \dots, \vec{\xi} t_n$  соответственно в моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_n \in T_1$ . Необходимо по известным значениям  $\vec{\xi} t_i$  определить величины этой функции  $\vec{\xi} t_{n+1}, \dots, \vec{\xi} t_{n+j}, \dots, \vec{\xi} t_{n+m}$  в моменты времени  $t_{n+1}, \dots, t_{n+j}, \dots, t_{n+m} \in T_2$ , где  $T_2$  – область будущих моментов времени. Задача может решаться как для каждой координаты вектора  $\vec{\xi}_s t$ , так и для самого вектора  $\vec{\xi} t$  (рис. 13).

Очевидно, что подобная постановка задачи справедлива в случае, если  $\vec{\xi} t_0, \dots, \vec{\xi} t_n$  определяют значения  $\vec{\xi} t_{n+1}, \dots, \vec{\xi} t_{n+m}$ , иными словами, процесс инерционен во времени и все изменения, происшедшие в прошлом, накапливаются, то есть существует явная необходимость диагностируемого процесса.

Наиболее приемлемым случаем решения поставленной задачи, безусловно, является адекватное описание изменения функции  $\vec{\xi} t$  каким-либо аналитическим выражением.

При этом чаще всего используют приемы численного анализа. Известно, что задача интерполирования заключается в нахождении значений функции  $\vec{\xi} t$  для промежуточных значений аргумента  $t_i < t < t_{i+1}$ ,  $i = \overline{0, n}$ , где  $t_i$  – дискретные значения аргумента при которых функция  $\xi t$  известна. При этом

вместо функции  $\xi t$  оперируют с функцией  $Y t$ , достаточно простой для вычисления, которая в заданных точках  $t_0, t_1, \dots, t_n$  принимает значения  $\xi t_0, \xi t_1, \dots, \xi t_i, \xi t_n$ , то есть

$$Y t_i = \xi t_i, \quad i = \overline{0, n} \quad (31)$$

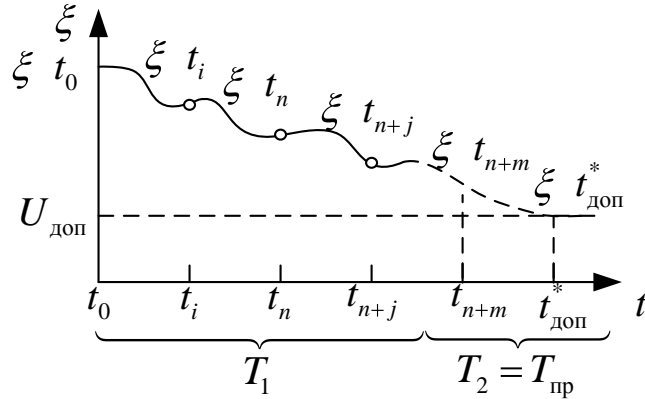


Рис. 13. Прогнозирование процесса  $\xi t$

Функцию  $Y t_i$  называют интерполирующей и отыскивают в виде алгебраического многочлена, получая при этом на небольших временных интервалах достаточно хорошие приближения.

Задачу экстраполяции, заключающуюся в отыскании значений функции  $\xi t$  вне области известных значений аргумента  $T_1, t_i \in T_1$ , сформулируем следующим образом.

По данным значениям  $t t_0, t_1, \dots, t_n$  и  $\xi t [\xi t_0, \dots, \xi t_n]$  необходимо найти многочлен  $Y t$  степени  $n$ , удовлетворяющий условию (31) и неравенству:

$$\xi t_{n+j} - Y t_{n+j} < \varepsilon_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (32)$$

где:  $\xi t_{n+j}$  – неизвестные значения функции  $\xi t$  в области  $T_2$ :

$\xi t_{n+j} \approx Y t_{n+j} \pm \varepsilon_j$ ,  $\varepsilon_j$  – заданные величины (погрешности).

В общем случае многочлены имеют вид:

$$Y t = \sum_{i=1}^{\mu} \alpha_i \varphi_i t, \quad (33)$$

где:  $\alpha_i = f[\xi t_i]$  – неизвестные коэффициенты;  $\varphi_i t$  – функция простейшего вида от текущего значения аргумента  $t$ . Коэффициенты в (33) определяются не из условия (31), а из условия метода наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n [\xi t_i - Y t_i]^2 = \min.$$



В качестве экстраполяционных полиномов могут быть использованы интерполяционные полиномы, которые претерпели определенную модификацию:

полином Лагранжа:

$$Y_{\text{Л}} t = \sum_{i=1}^{\mu} L_i \xi t_i, \quad (34)$$

$$\text{где } L_i - \text{коэффициенты Лагранжа: } L_i = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq \mu-1}}^{j=\mu} m+j \Big/ \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{j=\mu} i-j, \quad (35)$$

значения которых табулированы;

формула Ньютона:

$$Y_{\text{Н}} t = \xi t_n + \Delta \xi_{n-1} N_1 + \Delta^2 \xi_{n-2} N_2 + \Delta^3 \xi_{n-3} N_3 + \dots, \quad (36)$$

где  $N_k$  – табулированные коэффициенты разложения Ньютона:

$$N_k = \frac{1}{k!} \prod_{k=1}^{k=\mu} m-1+k, \quad \Delta^k \xi_{n-k} - \text{конечные разности } k\text{-го порядка;}$$

ряд Тейлора:

$$Y_{\text{Т}} t = \xi t_n + \xi' t_n \gamma_1 + \xi'' t_n \gamma_2 + \dots + \xi^k t_n \gamma_k, \quad (37)$$

где:  $\xi^k t_n$  –  $k$ -я производная в точке  $t_n$ ;  $\gamma_k = m^k/k!$  – коэффициенты ряда Тейлора, для которых составлены таблицы.

### 2.3.2. Вероятностное прогнозирование

При определении вероятности выхода (невыхода) контролируемого процесса за установленные значения поля допуска задача прогнозирования может быть сформулирована следующим образом. Пусть получены значения параметров  $\xi_v, v = \overline{1, k}$  в моменты времени  $t_i, i = \overline{1, n}$ . В каждом временном сечении состояние объекта полностью характеризуется функцией распределения  $F_i \vec{\xi}$ . По известным значениям  $\xi_v t_i, \vec{\xi} t_i, F_i \vec{\xi}, t_i \in t_0, t_n$  необходимо вычислить вероятность сохранения работоспособности ОД:

$$F_{n+j} \vec{\xi}^* = P \vec{\xi} t_{n+j} < \vec{\xi}^* = \int_{\vec{\xi}^*}^{\infty} f_{i_{n+j}} \vec{\xi} d\vec{\xi},$$

где:  $\vec{\xi}^*$  – допустимое значение функции  $\vec{\xi} t$ ;  $f_{i_{n+j}} \vec{\xi}$  – плотность распределения значений  $\vec{\xi} t$  во времени сечения  $t$  в области  $t_{n+1}, t_{n+m}$  для значений  $t_{n+j}, j = \overline{1, m}$  (рис. 14) с математическим ожиданием  $m_g t$  и дисперсией  $\sigma_{\xi}^2 t$ .

Значения параметров РЭО под воздействием множества факторов, влияние которых можно характеризовать как влияние внешних возмущений, изменяются случайным образом. В тех случаях, когда "случайность" в

поведении параметров велика, прибегают к вероятностной оценке средств совокупности параметров, изменяющихся во времени. Совокупность параметров представляется, таким образом, совокупностью случайных величин и, следовательно, необходимо знание закона распределения:

$$F_t \xi = P \xi t < \xi .$$

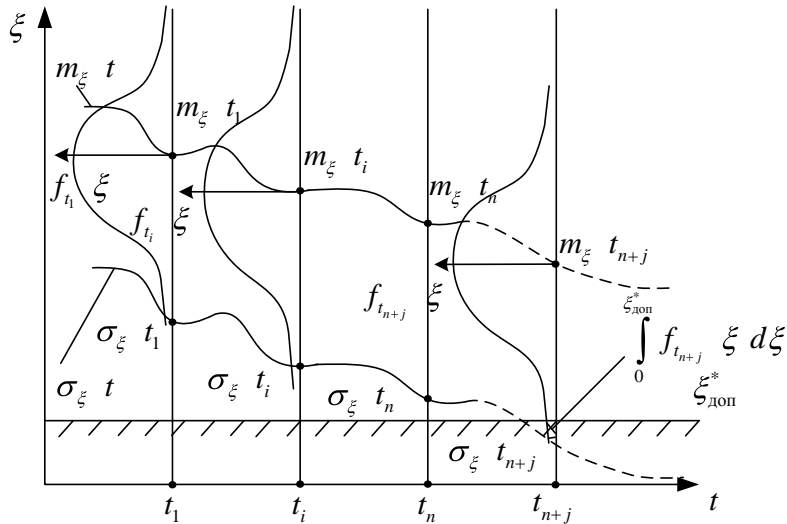


Рис. 14. Вероятностное прогнозирование

Зная функцию  $F_t \xi$  контролируемого параметра  $\xi t$ , можно определить вероятность попадания значений функции на любой интервал оси  $\xi$ . Целью вероятностного попадания является определение вероятности выхода (невыхода) параметра за допустимый предел  $\xi^*$  или, иными словами, вероятности отказа ОД.

Распределение значений контролируемого параметра РЭС в точке, соответствующей моменту  $t$ , определяется плотностью вероятности  $f_t \xi = F'_t \xi$ , а искомую вероятность можно определить в виде:

$$P \xi t < \xi^* = \int_{-\infty}^{\xi^*} f \xi d\xi. \quad (38)$$

Практически чаще всего используется нормальное распределение:

$$f_t \xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2 \xi}} \exp \left[ -\frac{[\xi t - m_t \xi]^2}{2\sigma_t^2 \xi} \right], \quad (39)$$

где  $m_t \xi$  и  $\sigma_t^2 \xi$  – математическое ожидание и дисперсия параметров  $\xi$  в сечении  $t$ .

Статистические значения  $m \xi$  и  $\sigma \xi$  вычисляются с помощью следующих выражений:

$$\hat{m}_{\xi} = \sum_{i=1}^n \xi_i p_i, \quad \hat{\sigma}_{\xi} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\xi_i - \hat{m}_{\xi}]^2 p_i},$$

где  $p_i$  – вероятность, соответствующая появлению значения параметров  $\xi_i$ .

### 2.3.3. Статистическая классификация

Статистическая классификация, как третье направление прогнозирования, предусматривает отнесение диагностируемого процесса объекта к одному из классов и допускает следующую формулировку задачи в рамках теории распознавания образов.

Пусть в момент  $t_0$  получены значения параметров контролируемого процесса  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_v, \dots, \xi_k$ , характеризующие функцию  $\vec{\xi}_0$ . Необходимо по совокупности полученных параметров  $\xi_v, v = \overline{1, k}$ , координат вектора  $\vec{\xi}_0$  принять решение о принадлежности процесса к тому или иному классу  $R^{\Psi}$ ,  $\Psi = \overline{1, m}$ , где  $R^{\Psi}$  могут быть параметрическими:  $R_{\xi^1} = \xi^0 \dots \xi^1, R_{\xi^2} = \xi^1 \dots \xi^2, \dots$  или временными  $R_{T^1} = 0 \dots T, R_{T^2} = T \dots 2T, \dots$  и др. (рис. 15). Здесь  $[\xi^0, \xi^1], [\xi^1, \xi^2], 0, T, T, 2T, \dots$  – выбранные интервалы в поле допуска и на временной оси. Множество и размер классов определяются специфическими особенностями ОД; они объединяют РЭС, характеризующиеся идентичностью показателей состояния, совокупностью свойств и т.д.

В общем случае алгоритм прогнозирования можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 16, где показана схема распознавания (СР) (классификации) и схема обучения (СО), первая из которых предназначена для принятия логического решения, которое выдается на выходе схемы и соответствует определенной выходной информации о работоспособности ОД, а вторая изменяет параметры СР в соответствии с отношением между совокупностью параметров, поданных на вход схемы.

Пусть необходимо классифицировать объекты на два класса ( $R_{T^1}$  и  $R_{T^2}$ ), когда на вход модели поступает совокупность параметров  $\xi$  объекта или, иначе, вектор состояния ОД  $\vec{\xi}$  на выходе СР образует  $\vec{Y} = \Delta \vec{\xi}$ , принадлежащий  $R_{T^1}$  или  $R_{T^2}$ .

Желаемый выходной вектор, соответствующий  $\vec{\xi}$  задается извне "обучающим фактором" и обозначается  $\vec{Z} = \varphi \vec{\xi}$ . СО изменяет параметры распознавания таким образом, чтобы  $\vec{Y}$  совпадал с  $\vec{Z}$  максимальное число раз.

Этот процесс именуют априорным опытом модели, который можно выразить двумя совместными вероятностями:

$$\left. \begin{aligned} P \vec{\xi}_\ell; \vec{Z}_\ell \in R_t^1 &= P \vec{\xi}_\ell P \vec{Z}_\ell = R_T^1 / \xi_\ell ; \\ P \vec{\xi}_\ell; \vec{Z}_\ell \in R_t^2 &= P \vec{\xi}_\ell P \vec{Z}_\ell = R_T^2 / \xi_\ell \end{aligned} \right\}, \quad (40)$$

где:  $\ell = \overline{1, N}$ ,  $P \vec{\xi}_\ell$  – вероятность появления  $\vec{\xi}_\ell$ ;  $P \vec{\xi}_\ell; \vec{Z}_\ell \in R_t^{1,2}$  – совместная вероятность появления  $\vec{\xi}_\ell$  и  $\vec{Z}_\ell \in R_t^{1,2}$ ;  $P \vec{Z}_\ell = R_T^{1,2} / \vec{\xi}_\ell$  – условная вероятность появления  $\vec{Z}_\ell \in R_t^{1,2}$ , если наблюдается объект, которому соответствует  $\vec{\xi}_\ell$ .

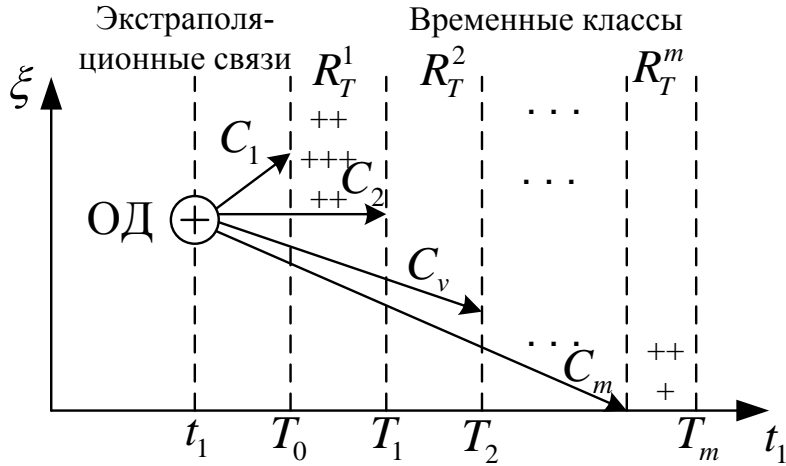


Рис. 15. Статистическая классификация ОК

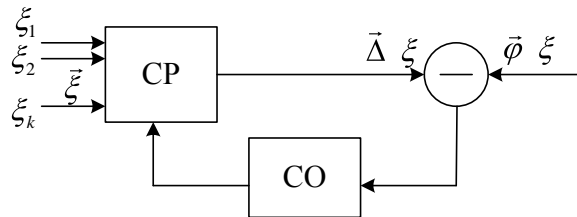


Рис. 16. Схема процесса классификации

Согласно (40), входному вектору  $\vec{\xi}_\ell$  на выходе схемы распознавания будет соответствовать ситуация  $\vec{\xi}_\ell \in R_T^2$  с вероятностью ошибки  $P \vec{\xi}_\ell; \vec{Z}_\ell \in R_T^1$ . Минимум ошибки распознавания для каждого объекта прогнозирования будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \vec{Y}_\ell \in R_T^1 &\text{ если } \delta_\ell > 0; \\ \vec{Y}_\ell \in R_T^2 &\text{ если } \delta_\ell < 0, \end{aligned}$$

где  $\delta_\ell = P \vec{\xi}_\ell, \vec{Z}_\ell \in R_T^1 - P \vec{\xi}_\ell, \vec{Z}_\ell \in R_T^2$ .

В случае  $\delta_\ell = 0$  принимают решение  $\vec{Z}_\ell \in R_T^1$  или отказываются от распознавания.

Требование минимума ошибки распознавания или минимума среднего

риска  $W(q, \delta)$  при некоторых предположениях приводит к выражению, именуемому отношением правдоподобия (ОПП):

$$\Theta(\vec{\xi}) = \frac{f(\vec{\xi}/R_T^1)}{f(\vec{\xi}/R_T^2)} = \frac{P(\vec{\xi}_\ell, \vec{Z}_\ell \in R_T^1)}{P(\vec{\xi}_\ell, \vec{Z}_\ell \in R_T^2)} \leq \varphi[W(q_\lambda, \delta_\ell)], \quad (41)$$

где:  $f(\vec{\xi}/R_T^{1,2})$  – условная плотность распределения вероятности того, что  $\vec{\xi}$  относится к  $R_T^{1,2}$ ;  $q^{1,2}$  – априорная вероятность классов  $R_T^{1,2}$ .

Если известно выражение для  $f(\vec{\xi}/R_T^{1,2})$ , то решающее правило определить несложно.

Величина  $W(q, \delta)$  определяется как математическое ожидание функций потерь (средний риск):

$$W(q, \delta) = \sum_{i=1}^m \sum_{\lambda=1}^m \int_{\vec{\xi}} \delta(d_i/\vec{\xi}) q_\lambda \omega_{i\lambda} f(\vec{\xi}/R^\lambda) d\vec{\xi},$$

где:  $d_i$  – решение, соответствующее принадлежности объекта к классу  $R^i$ , принимаемое из общего числа возможных решений  $D = d_0, d_1, \dots, d_m$ ;  $d_0$  – решение, означающее отказ от классификации;  $\omega(d_i, R^\lambda) = \omega_i \lambda$  – весовая функция (функция потерь), представляющая собой потери, вызванные тем, что принято решение  $d_i$ , в то время, когда истинно  $d_\lambda$ ,  $\omega_i \lambda > \omega_0 \lambda > \omega_\lambda \lambda$ ,  $i \neq \lambda \neq 0$ .

В заключение отметим, что инженерная реализация методов прогнозирования отличается большим разнообразием математических способов, из которых укажем следующие:

1. Аналитическое прогнозирование: градиентный метод, метод Бокса-Вильсона, метод обобщенного параметра, метод прогнозирования с адаптацией.
2. Вероятностное прогнозирование: метод статистического градиента, прогнозирование известных функций распределения, прогнозирование неизвестных функций распределения, прогнозирование неаппроксимируемых функций распределения, прогнозирование характеристик надежности, прогнозирование марковских процессов, прогнозирование многоэкстремальных процессов.
3. Статистическая классификация: метод статистических решений, метод потенциальных функций, детерминированные методы, вероятностные методы, дискриминантный анализ.

### 3. ПОКАЗАТЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ

Понятие "показатель диагностирования" относится к комплексной характеристике, определяющей основные параметры системы диагностирования и контроля. Основной физической характеристикой системы диагностики о функциональном состоянии РЭО является достоверность

информации, отражающая степень доверия пользователя к полученным результатам. Достоверность контроля определяется: точностью измерения ДП, глубиной и полнотой контроля, безотказностью и помехозащищенностью СрД и К, закономерностями ДП и допусков на них; методикой измерения ДП, способами документирования и представления информации, условиями и местом проведения диагностирования, а также условиями устанавливаемыми нормативной документацией на НТП.

Состояние РЭО характеризуется параметром  $\xi_c t$ , который является случайной величиной с плотностью распределения  $W \xi_c$ . ОД считается работоспособным, если параметр  $\xi_c t$  находится в пределах поля допуска, имеющего соответствующие нижнюю и верхнюю границу  $\xi_H$  и  $\xi_B$ , то есть  $\xi_H < \xi_c t < \xi_B$ .

Очевидно, что априорные вероятности пребывания ОД в состоянии работоспособности и отказа соответственно равны:

$$P_H = \int_{\xi_H}^{\xi_B} W \xi_c d\xi_c; \quad Q_H = \int_{-\infty}^{\xi_H} W \xi_c d\xi_c + \int_{\xi_B}^{+\infty} W \xi_c d\xi_c.$$

### 3.1. Показатели диагностирования

При диагностировании РЭС возможна вероятность совместного наступления двух событий: ОД находится в техническом состоянии  $i$ , а в результате диагностирования ему присваивается нахождение в состоянии  $j$ . Эта вероятность называется вероятностью ошибки диагностирования вида  $(i, j)$  и определяется по формуле [1]:

$$P_{ij} = P_i^0 \sum_{\ell=1}^k P_{\ell}^c P_{jil}^y = \sum_{\ell=1}^k P_{\ell}^c P_{j\ell}^a P_{ij\ell}^b, \quad (42)$$

где:  $k$  – число состояний СрД и К;  $P_i^0$  – априорная вероятность нахождения ОД в состоянии  $i$ ;  $P_{\ell}^c$  – априорная вероятность нахождения СрД и К в состоянии  $\ell$ ;  $P_{jil}^y$  – условная вероятность того, что в результате диагностирования ОД признан находящимся в состоянии  $j$  при условии, что он находится в состоянии  $i$ , а СрД и К – в состоянии  $\ell$ ;  $P_{j\ell}^a$  – условная вероятность получения результата «ОД в состоянии  $j$ » при условии, что СрД и К в состоянии  $\ell$ ;  $P_{ij\ell}^b$  – условная вероятность нахождения ОД в состоянии  $i$  при условии, что получен результат «ОД в состоянии  $j$ », а СрД и К – в состоянии  $\ell$ .

Очевидно, что если  $i=j$ , то мы имеем дело с вероятностью правильного определения функционального состояния  $i$  ОД.

Если известны статистические характеристики испытаний СрД и К, то вероятность ошибки определяется по формуле:

$$P_{ij}^* = P_i^0 \sum_{\ell=1}^k P_{\ell}^c \Psi_{jil} / N_{i\ell}, \quad (43)$$

где:  $N_{i\ell}$  – общее число испытаний СрД и К;  $\Psi_{jil}$  – число испытаний, при которых система диагностирования зафиксировала состояние  $j$ ; вероятности  $P_i^0$  и  $P_\ell^c$  определяются методами теории надежности.

Если состояние РЭС определяется совокупностью  $m$  независимых ДП и СрД и К различает  $2^m$  состояний ОД, то

$$P_{ij} = \sum_{i=1}^k P_\ell^c \prod_{v=1}^m f_{ijv\ell}, \quad (44)$$

где  $f_{ijv\ell}$  – функция, значение которой зависит от конкретной ситуации:

1. Если в состоянии  $i$  и  $j$  ОД параметр  $v$  находится в допуске и СрД и К в состоянии  $\ell$ , то  $f_{ijv\ell} = P_v - \alpha_{v\ell}$ , где  $P_v$  – априорная вероятность нахождения ДП в поле допуска;  $\alpha_{v\ell}$  – вероятность совместного наступления двух событий: ДП – в поле допуска, а считается вне поля допуска при условии, что СрД и К находится в состоянии  $\ell$ .

2. Если в состоянии  $i$  ОД параметр  $v$  находится в допуске, а в состоянии  $j$  параметр вне поля допуска при условии, что СрД и К в состоянии  $\ell$ , то  $f_{ijv\ell} = \alpha_{v\ell}$ .

3. Если в состоянии  $i$  ОД параметр  $v$  находится вне поля допуска, а в состоянии  $j$  – параметр  $v$  – в поле допуска при условии что СрД и К в состоянии  $\ell$ , то  $f_{ijv\ell} = \beta_{v\ell}$ , где  $\beta_{v\ell}$  – вероятность наступления двух событий: ДП  $v$  находится вне поля допуска, а его считают находящимся в поле допуска при условии, что СрД и К – в состоянии  $\ell$ .

4. Если в состоянии  $i$  и  $j$  ОД параметр  $v$  находится вне поля допуска при условии, что СрД и К в состоянии  $\ell$ , то  $f_{ijv\ell} = 1 - P_v - \beta_{v\ell}$ .

Для системы диагностики и контроля, предназначенной для проверки работоспособности по альтернативному признаку, то есть при двух состояниях ( $m=2$ ), следует устанавливать индексацию:  $i=1(j=1)$  – работоспособное состояние;  $i=0(j=0)$  – неработоспособное состояние.

Тогда вероятность ошибки диагностирования вида (1;0)  $P_{10}$  является вероятностью совместного наступления двух событий: ОД находится в работоспособном состоянии, а по результатам контроля считается находящимся в неработоспособном состоянии, вероятность вида (0;1)  $P_{01}$  – вероятность совместного наступления двух событий ОД – в неработоспособном состоянии считается находящимся в работоспособном (ошибки I-го и II-го рода).

Вероятности ошибок диагностирования:

$$P_{01} = P_0^0 \sum_{\ell=1}^k P_\ell^c P_{10\ell}^y = \sum_{\ell=1}^k P_\ell^c P_{1\ell}^a P_{01\ell}^b; \quad (45)$$

$$P_{10} = P_1^0 \sum_{\ell=1}^k P_\ell^c P_{01\ell}^y = \sum_{\ell=1}^k P_\ell^c P_{0\ell}^a P_{10\ell}^b, \quad (46)$$

где составляющие определяются соотношениями (42) и указанной ранее индексацией.

В случае определения состояния РЭС совокупностью  $m$  независимых ДП ( $v = \overline{1, m}$ ) вероятности ошибок (45) и (46) принимают вид:

$$P_{01} = P_0^0 \sum_{\ell=1}^k P_\ell^c \left( \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell} + \beta_{v\ell} - \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell} \right), \quad (47)$$

$$P_{10} = P_1^0 \sum_{\ell=1}^k P_\ell^c \left( \prod_{v=1}^m P_v - \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell} \right). \quad (48)$$

СрД и К можно представить в виде одного из трех состояний:  $\ell = \overline{1, 3}$   $\ell=1$  – работоспособное при правильной индексации;  $\ell=2$  – неработоспособное при индексации «ОД работоспособен»;  $\ell=3$  – неработоспособное при индексации «ОД неработоспособное». С учетом этого вероятности ошибок диагностирования:

$$P_{01} = P_1^c \left( \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell} + \beta_{v\ell} - \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell} \right) + P_2^c \left( 1 - \prod_{v=1}^m P_v \right),$$

$$P_{10} = P_1^c \left( \prod_{v=1}^m P_v - \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell} \right) + P_3^c \prod_{v=1}^m P_v.$$

Если пренебречь отказами СрД и К, то есть считать  $P_1^c = P_2^c = P_3^c = 0$ , то соотношение для ошибок диагностирования имеет вид:

$$P_{01} = \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell} + \beta_{v\ell} - \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell},$$

$$P_{10} = \prod_{v=1}^m P_v - \prod_{v=1}^m P_v - \alpha_{v\ell}.$$

Апостериорные вероятности ошибок диагностирования вида  $(i, j)$  вычисляются по формулам:

$$P_{ij}^A = P_{ij} / \sum P_{ij}, P_{01}^A = P_{01} / (P_{01} + P_{00}), P_{10}^A = P_{10} / (P_{01} + P_{11}).$$

Вероятность правильного диагностирования:

$$D = \sum_{i=1}^n P_{ii} = 1 - \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n P_{ij}. \quad (49)$$

С учетом возможных ситуаций, когда проверяются только работоспособность РЭС (при определении  $S_p$  совокупностью  $m$  параметров) и учета трех состояний СрД и К выражения для вероятности правильного диагностирования принимают соответственно следующий вид:

$$D = \sum_{\ell=1}^k P_\ell^c \sum_{v=1}^m 1 - \alpha_{v\ell} + \beta_{v\ell}; \quad (50)$$



$$D = P_1^c \prod_{v=1}^m 1 - \alpha_{v\ell} + \beta_{v\ell} + P_2^c \prod_{v=1}^m P_v + P_3^c \left( \prod_{v=1}^m 1 - P_v \right). \quad (51)$$

Из (51) следует, что при  $P_1^c = 1$  полная вероятность правильного диагностирования равна

$$D = \prod_{v=1}^m 1 - \alpha_{v\ell} + \beta_{v\ell}. \quad (52)$$

Таким образом, выражение (52) определяет то функциональное состояние РЭС, в котором она как ОД действительно находится.

Математическое ожидание оперативной продолжительности, однократного диагностирования  $\tau_d$  является средней оперативной продолжительностью и определяется по формуле:

$$\tau_d = \sum_{i=1}^n \tau_i P_i^c = \sum_{i=1}^n P_i^c \sum_{\ell=1}^k \tau_{i\ell} P_\ell^c, \quad (53)$$

где:  $\tau_{ig}$  – средняя оперативная продолжительность ОД в состоянии  $i$ ;  $\tau_{i\ell}$  – оперативная продолжительность ОД в состоянии  $I$  при условии, что СрД и К в состоянии  $\ell$ . В состав  $\tau_i$  входят как продолжительность выполнения вспомогательных операций, так и основных операций.

При расчете этого показателя по статистическим данным испытаний РЭС оценочная формула принимает вид:

$$\tau_d^* = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N \sum_{i=1}^n \tau_{ig} P_i^0, \quad (54)$$

где  $\tau_{ig}$  – средняя оперативная продолжительность диагностирования ОД в состоянии  $i$  при  $g$ -м испытании.

Аналогично определяется средняя стоимость диагностирования:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_i P_i^0 = \sum_{i=1}^n P_i^0 \sum_{\ell=1}^k C_{i\ell} P_\ell^c, \quad (55)$$

где  $C_i$  – средняя стоимость диагностирования объекта в состоянии  $i$ .

Средняя трудоемкость диагностирования

$$V_d = \sum_{i=1}^n V_{di} P_i^0 = \sum_{i=1}^n P_i^0 \sum_{\ell=1}^k V_{di\ell} P_\ell^c, \quad (56)$$

а по статистическим данным эксплуатации (испытаний)

$$V_d = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N \sum_{i=1}^n V_{dig}^* P_i^0, \quad (57)$$

Приведем в табл. 2 ситуационные модели состояний ОД и СрД и К.

### 3.2. Показатели контролепригодности

В принципе контролепригодность РЭО или ОД оценивается полнотой диагностирования, глубиной контроля возникшей неисправности, затратами времени, труда и средств.

Рассмотрим наиболее важные показатели контролепригодности:

1. Показатели, характеризующие полноту диагностирования:

- коэффициент полноты проверки

$$K_{\text{ПП}} = \sum_{i=1}^m \gamma_i \Psi_i / \sum_{i=1}^M \gamma_i \Psi_i, \quad (58)$$

где  $\gamma_i, \Psi_i$  – соответственно коэффициент важности и коэффициент безотказности  $i$ -го ДП;  $m, M$  – соответственно число оцениваемых и общее число ДП.

Этот показатель в основном определяет методическую достоверность диагностирования.

Таблица 2

Ситуация состояний объекта и средств диагностирования

Состояние ОД	Состояние СрД и К	Решение о состоянии ОД	Ситуация
$P$	$P$	$P$	Правильное диагностирование
$P$	$P$	$\bar{P}$	Ошибка 1-го рода (погрешности)
$P$	$\bar{P}$	$P$	Правильное диагностирование
$P$	$\bar{P}$	$\bar{P}$	Ошибка 1-го рода (отказ СрД и К)
$\bar{P}$	$P$	$P$	Ошибка 2-го рода (погрешности)
$\bar{P}$	$P$	$\bar{P}$	Правильное диагностирование
$\bar{P}$	$\bar{P}$	$P$	Ошибка 2-го рода (отказ СрД и К)
$\bar{P}$	$\bar{P}$	$\bar{P}$	Правильное диагностирование

- коэффициент глубины поиска дефекта

$$K_{\text{ГП}} = \omega_0 / \omega, \quad (59)$$

где  $\omega_0$  – число дефектов кратности, не большей  $i$ , определяемых однозначно;  $\omega$  – число возможных дефектов в ОД кратности, не большей  $i$ .

Иногда глубину поиска дефекта определяют в виде:

$$K_{\text{ГП}} = W/R, \quad (60)$$

представляющем собой отношение числа  $W$  структурных единиц ОД, с точностью до которых обнаруживается дефект, к общему числу  $R$  структурных элементов, на которое подразделяется ОД. Расчет  $K_{\text{ГП}}$  обычно ведут по ФДМ или по матрице состояний;

- среднее число структурных единиц ОД, с точностью до которых определяется место возникновения дефицита:

$$N = \sum_{i=1}^n g_i r_i, \quad (61)$$

где  $g_i$  – вероятность возникновения  $i$ -го дефекта,  $n$  – число дефектов, не различаемых с  $i$ -м дефектом;  $r_i$  – число возможных дефектов.

2. Показатели, характеризующие прямые затраты на диагностирование объекта:

- среднее время диагностирования (контроля) определяется по формуле (53);  
длина теста диагностирования  $L = N$ , (62)

где  $N$  – число элементарных проверок;

- относительная трудоемкость диагностирования блока  $S_{di} = 1 - \tau_{di} / \tau_d$ ,

где  $\tau_{di}$  – время диагностирования  $i$ -го блока ОД;

- коэффициент трудоемкости подготовки к диагностированию  $K_{ТД} = S_d - S_n / S_d$ , где:  $S_d$  – средняя оперативная трудоемкость диагностирования,  $S_n$  – средняя трудоемкость подготовки к диагностированию;

- производительность диагностирования (коэффициент использования времени):

$$K_{BP} = \sum_{i=1}^m t_i / \left( \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{BPi} \right), \quad (63)$$

где:  $t_i$  – среднее время, затрачиваемое на  $i$ -ю проверку;  $t_{BPi}$  – среднее время, затрачиваемое на вспомогательные операции при  $i$ -й проверке;  $n$  и  $m$  – соответственно общее и реализуемое количество проверок (измерений).

3. Вспомогательные операции, характеризующие организацию процесса диагностирования:

- коэффициент механизации диагностирования:

$$K_{МД} = 1 - t_{чм} / t_{пм}, \quad (64)$$

где  $t_{чм}$  и  $t_{пм}$  — соответственно временные затраты на частично и полностью механизированное диагностирование;

- коэффициент автоматизации диагностирования:

$$K_{АД} = t_{АД} / (t_{АД} + t_{АП}), \quad (65)$$

где:  $t_{АД}$  – время диагностирования автоматизированным СТД;  $t_{АП}$  – время подготовки ОД при использовании автоматизированных СТД.

### 3.3. Расчет показателей диагностирования

Аналитический расчет показателей диагностирования позволяет определить вероятности пребывания РЭС в соответствующих состояниях и вероятности принятых гипотез.

#### 3.3.1. Ошибки в тракте диагностирования

В ходе реального процесса контроля параметров РЭО, как следствие воздействия многих факторов, вместо величины  $\xi_e t$  получаем величину

$$\xi t = \xi_e t + \xi_{п} t .$$

В результате необходима замена допусковой области и принятие решений по критерию  $\xi_B > \xi t > \xi_H$ . Возможности принятия решений в процессе технической диагностики и контроля можно рассматривать как следующие гипотезы:

$H_{11}$  – истинное и измеренное значение параметра  $\xi_c$  в пределах допуска  $\xi_H < \xi_c < \xi_B$ ;

$H_{10}$  – истинное значение параметра в пределах допуска, а измеренное – вне допуска  $\xi_c < \xi_H$ ;  $\xi_B < \xi_c$ ;

$H_{01}$  – истинное значение параметра вне допуска  $\xi_c < \xi_H$  и  $\xi_B < \xi_c$ , а измеренное в пределах допуска;

$H_{00}$  – истинное и измеренное значения параметров вне пределов допуска.

Гипотезы  $H_{11}$  и  $H_{00}$  представляют верные, а гипотезы  $H_{10}$  и  $H_{01}$  – ошибочные решения, причем первые могут быть непосредственно использованы как критерий достоверности, а вторые – как мера недостоверности

$$D = P H_{11} + P H_{00} = 1 - P H_{10} - P H_{01} . \quad (66)$$

Очевидно, что ситуации ОД – работоспособен (неработоспособен) определяются соотношениями:

$$D_P = P H_{11} / P H_{11} + P H_{01} , \quad (67)$$

$$D_{HP} = P H_{00} / P H_{00} + P H_{10} . \quad (68)$$

Для вычисления вероятностей  $P H_{ij}$  ситуации (рис. 17):

- а)  $P_1 \xi$  – показатель качества ниже области допуска; б)  $P_2 \xi$  в допуске; в)  $P_3 \xi$  – выше допуска.

При диагностировании контролируется показатель качества функционирования РЭС (параметр РЭС, ДП)  $\xi t$ , который должен сходиться в допустимых пределах (в поле допуска)  $\xi_H < \xi_c < \xi_B$ .

Считая, что систематические погрешности отсутствуют, а плотности распределения ДП  $W_1 \xi$  и плотность распределения погрешностей  $W_2 \Delta$  независимы, получаем три ситуации:

- ОД признается неработоспособным, так как  $\xi < \xi_H$ .
- ОД признается работоспособным.
- ОД признается неработоспособным, так как  $\xi > \xi_B$ .

Соответственно имеем:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 \xi &= W_1 \xi \int_{-\infty}^{\xi_H - \xi} W_2 \Delta d\Delta; \\ \varphi_2 \xi &= W_1 \xi \int_{\xi_H - \xi}^{\xi_B - \xi} W_2 \Delta d\Delta; \\ \varphi_3 \xi &= W_1 \xi \int_{\xi_B - \xi}^{+\infty} W_2 \Delta d\Delta. \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

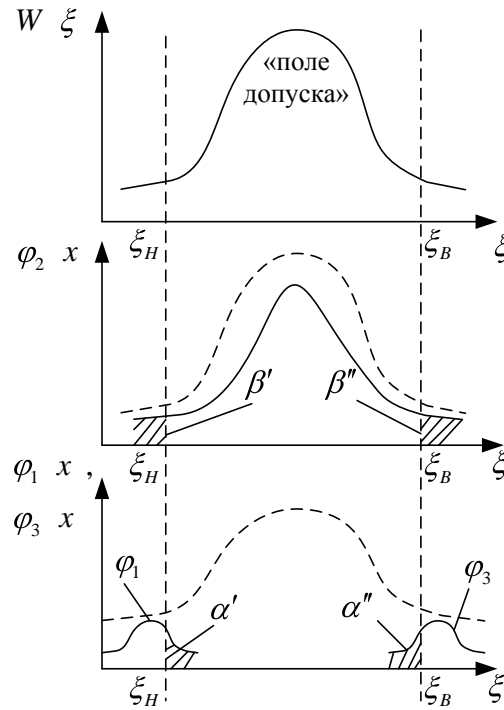


Рис. 17. Вычисление показателей ОД

Учитывая, что  $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1 \xi d\xi + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_2 \xi d\xi + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_3 \xi d\xi = 1$ , соотношения для расчёта вероятностей гипотез будут иметь вид:

$$P H_{11} = \int_{\xi_H}^{\xi_B} W_1 \xi \left( \int_{\xi_H - \xi}^{\xi_B - \xi} W_2 \Delta d\Delta \right) d\xi; \quad (70)$$

$$P H_{00} = \int_{-\infty}^{\xi_H} W_1 \xi \left( \int_{-\infty}^{\xi_H - \xi} W_2 \Delta d\Delta + \int_{\xi_H - \xi}^{+\infty} W_2 \Delta d\Delta \right) d\xi + \quad (71)$$

$$+ \int_{\xi_B}^{+\infty} W_1 \xi \left( \int_{\xi_B - \xi}^{+\infty} W_2 \Delta d\Delta + \int_{-\infty}^{\xi_B - \xi} W_2 \Delta d\Delta \right) d\xi;$$

$$P H_{10} = \int_{\xi_H}^{\xi_H - \xi} W_1 \xi \left( \int_{-\infty}^{\xi_B - \xi} W_2 \Delta d\Delta \right) d\xi + \int_{\xi_H}^{\xi_B} W_1 \xi \left( \int_{\xi_B - \xi}^{+\infty} W_2 \Delta d\Delta \right) d\xi; \quad (72)$$

$$P H_{01} = \int_{-\infty}^{\xi_H - \xi} W_1 \xi \left( \int_{\xi_H - \xi}^{\xi_B - \xi} W_2 \Delta d\Delta \right) d\xi + \int_{\xi_B}^{+\infty} W_1 \xi \left( \int_{\xi_H - \xi}^{\xi_B - \xi} W_2 \Delta d\Delta \right) d\xi. \quad (73)$$

### 3.3.2. Аналитический и графоаналитический расчет показателей диагностирования

Если считать, что  $W \xi_v$  и  $\varphi \xi_v$  распределены нормально, то искомые значения вероятностей  $\alpha_v$  и  $\beta_v$  – ошибок определения состояния  $v$ -го параметра 1-го и 2-го рода для определения  $P_{10}$  и  $P_{01}$  могут быть представлены

В виде:

$$\alpha_{v\ell} = \frac{1}{2\pi} \int_{-x_v}^{x_v} e^{-\Delta^2/2} \left( \int_{-\infty}^{Z_v} e^{-t^2/2} dt + \int_{x_v-\Delta}^{+\infty} e^{-t^2/2} dt \right) d\Delta, \quad (74)$$

$$\beta_{v\ell} = \frac{1}{2\pi} \left( \int_{-\infty}^{-x_v} e^{-\Delta^2/2} \left( \int_{x_v-\Delta}^{Z_v} e^{-t^2/2} dt \right) d\Delta + \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\Delta^2/2} \left( \int_{x_v-\Delta}^{Z_v} e^{-t^2/2} dt \right) d\Delta \right), \quad (75)$$

где  $x_v, Z_v$  – нормированные величины, которые определяются значением допуска, среднеквадратической погрешностью измерения ДП  $\sigma_v$ , средним значением ДП, СКО ДП  $\sigma_{\Pi}$ .

При этом  $P_v = 2\Phi_0 \xi_v$  – для ДП с двусторонним допуском;

$P_v = 0,5 + \Phi_0 \xi_v$  – для ДП с односторонним допуском;

где  $\Phi \xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\xi} \exp -t^2/2 dt$  – нормированная функция Лапласа;

Эти нормированные величины вычисляются по следующим выражениям:

$|y_v| - x_v = |y_v| / \sigma_{\Pi v}$  (ДП с двусторонним допуском);

$x_v = |\delta_v - \xi_{0v}| / \sigma_{\Pi v}$  (ДП с односторонним допуском),

где  $\xi_{0v} = M \xi_v$ ;  $Z_v = \sigma_{Иv} / \sigma_{\Pi v}$ .

Для симметричных законов распределения и условия  $|d| \ll 2\delta = \xi_B - \xi_H$  вероятность  $P_{нз}$  при односторонних допусках численно равна половине ранее вычисленной вероятности при двустороннем допуске:  $P_{нз} = 0,5P_{нз} = P_{нз}$ .

### 3.4. Качество диагностирования

Качество систем оценивают совокупностью соответствующих показателей, подразделяющихся на единичные, интегральные и комплексные.

Примером последних является вероятность правильного диагностирования СТД, определяемая соотношением:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n P_{ij}.$$

Остановимся на вероятности правильной оценки состояния ОД и расчета коэффициента качества и эффективности.

Для обобщенной оценки качества  $K$  диагностирования служит критерий вероятности правильности диагноза. При этом объект описывается множеством  $A$  диагностических показателей  $\alpha_i$ , а его состояние определяется сравнением ДП с их номинальными значениями. На практике из-за ряда затруднений реализации метода диагностирования состояние ОД оценивается при ограниченной совокупности  $B$  показателей, причем, так как  $B \in A$ , то

достоверность диагностирования снижается.

Зависимость вероятности правильной оценки состояния ОД от показателей  $\alpha_i$  можно представить в виде "иерархической структуры" (рис. 18).

На уровне I находится показатель  $K$  – вероятность правильной оценки ОД.

На уровне II расположены показатели, характеризующие отдельные элементы, участвующие в процессе диагностирования: надежность технических средств диагностирования  $D_1$ , достоверность диагностирования  $D_2$ , надежность действий технического состава  $D_3$ .

Третий уровень включает коэффициент готовности  $P_1$ , вероятность безотказной работы  $P_2$ , показатель адекватности модели ОД  $P_3$ , вероятность работоспособности оператора  $P_6$  в момент  $t_0$ , показатель полноты диагностирования  $C_4$ , инструментальную достоверность  $C_5$ , работоспособности оператора  $P_7$ .

На уровне IV размещены параметры СТД –  $Y_i$ .

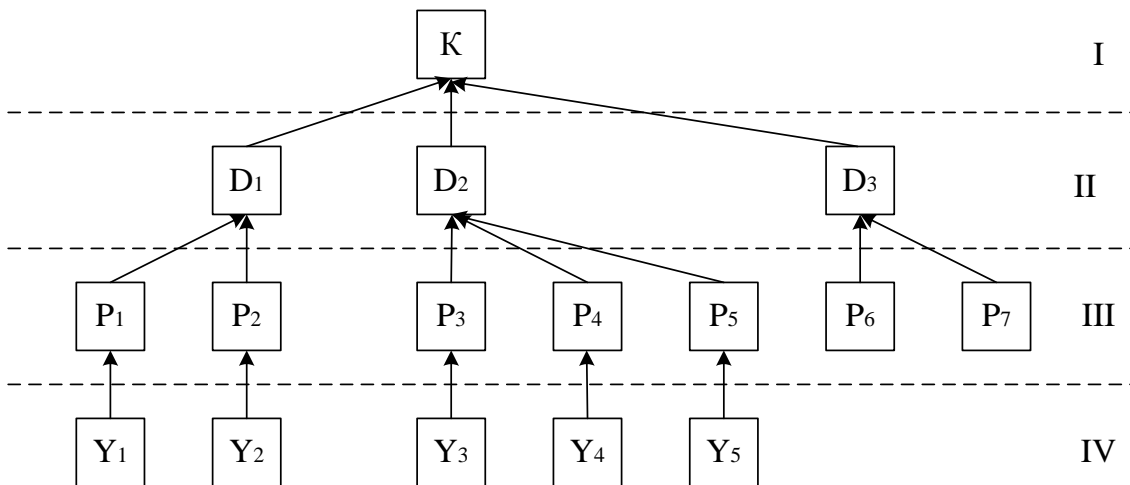


Рис. 18. Возможный вариант "иерархического дерева" для оценки вероятности правильного диагностирования в зависимости от  $\alpha_i$

Вышеперечисленные показатели "дерева" определяются с помощью зависимости  $x_j^{v-1} = f_i^v G_i^v$ , где:  $x_j^v$  – показатели  $v$ -го уровня, число которых равно  $n_v$ ,  $j = \overline{1, n}$ ;  $v$  – номер иерархического уровня;  $G_i^v$  – группы непересекающихся показателей  $v$ -го уровня, число которых равно  $m_v$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;  $f_i^v$  – функция связи между показателями разных уровней, которые определяют переход от непересекающихся групп  $Q_i^v$  показателей  $v$ -го уровня к показателям  $x_j^{v-1}$ -го уровня.

Для определения вероятности правильной оценки состояния ОД необходимо знать:

- количество и информативность ДП;
- величину СКО ДП от математического ожидания и погрешности измерения ДП;
- величину изменений ДП;
- коэффициент готовности и вероятность безопасной работы технических средств за время диагностирования;
- количество обнаруживаемых и необнаруживаемых дефектов в ОД.

Качество операций диагностирования и контроля в общем виде можно представить разностью:

$$K_{\text{э}} t = \Delta K = K t / t_{\text{д}} - K t ; t > t_{\text{д}},$$

Где:  $K t / t_{\text{д}}$  – качество ОД при условии, что в момент  $t_{\text{д}}$  проведено его диагностирование и техническое обслуживание;  $K t$  – качество ОД при условии, что не проводилось ТО.

Нормированный показатель качества использования СТД:

$$K_{\text{э}} = K t / t_{\text{д}} - K t / K t , 0 < K_{\text{э}} < 1.$$

Анализ результата применения СТД можно использовать в двух вариантах:

- для изменения безотказности изделия РЭС путем проведения работ ТО по данным диагностирования;
- для определения временного интервала  $\delta$ , в течение которого РЭС сохранит свою работоспособность с заданной вероятностью  $P_{\text{рд}}$ .

Если представить  $K t = K_0 t \cdot P t$ , где  $K_0 t$  – качество идеальной в надежностном смысле функционирования РЭС, а  $P(t)$  – вероятность безотказной работы, выступающая как мера снижения качества, то коэффициент качества использования:

$$K_{\text{э}} = P t / t_{\text{д}} - P t / P t ,$$

то есть определяется через показатели безотказности, а сам эффект от использования СТД и К выражается в повышении безотказности РЭС.

Если по результатам проведения диагностики и контроля необходимо определить время остатка работоспособного состояния системы  $\Delta T_p$  (то есть реализовать прогнозирующий контроль), то следует принять решающее правило:  $\Delta T_p > \tau$ , где  $\tau$  – заданное время сохранения  $S_p$ . Поскольку такая оценка всегда сопровождается погрешностями, то практически  $\tau < \Delta T_p^*$ , что и является физической основой ошибок прогноза сохраняемости 1-го и 2-го рода:

$$\alpha_{\text{п}} t = P \Delta T_p^* \leq \tau \mid \Delta T_p > \tau , \quad (76)$$

$$\beta_{\text{п}} t = P \Delta T_p^* > \tau \mid \Delta T_p \leq \tau . \quad (77)$$



Условная функция распределения остатка времени работоспособности:

$$P_0(t - t_d) = P(\Delta T_p < t - t_d | T_0 > t_d) = [F(t) - F(t_d)] / [1 - F(t_d)],$$

где:  $F(t) = P(T_p < t)$  – функция распределения времени сохранения работоспособного состояния,  $Q = F(t_d)$  – априорная вероятность поступления на диагностирование неработоспособных объектов и  $1 - Q = 1 - F(t_d)$  – априорная вероятность поступления на диагностирование работоспособных объектов, откуда априорная вероятность  $P(t)$  безотказной работы поступившего объекта  $P(t) = 1 - Q - F_0(t)$ , где  $F_0(t)$  – условная функция безотказности ОД.

Если считать, что вероятность безотказной работы ОД в течение интервала  $\tau$  при условии идеального диагностирования равна 1 и  $t_d = 0$ , то

$$K_{\ominus}(\tau) = [P_d(\tau) - P(\tau)] / [1 - P(\tau)], \quad (78)$$

где  $P_d(\tau)$  – апостериорная безотказность за интервал времени  $\tau$ .

В табл. 3 приведены данные для определения качества диагностирования с точки зрения достоверности предсказания интервала сохранения работоспособного состояния.

Для расчета качества в табл. 3 необходимо использовать следующие выражения:

$$K_{\Pi O} = \beta_{\Pi O} / (1 - \alpha_{\Pi}); \quad K_{\Pi \tau} = \beta_{\Pi \tau} / (1 - \alpha_{\Pi}),$$

$$\text{где } \alpha_{\Pi} = \frac{1}{1 - Q - F_0(\tau)} \int_{\tau}^{\infty} W_0(t) \int_{-\infty}^{\tau-t} W(\Delta) d\Delta dt; \quad \beta_{\Pi O} = \frac{1}{Q} \int_{\tau}^{\infty} W(\Delta) d\Delta;$$

$$W_0(t) = -dF_0(t) / dt; \quad \beta_{\Pi \tau} = \frac{1}{1 - Q - F_0(\tau)} \int_0^{\tau} W_0(t) \int_{\tau-t}^{\infty} W(\xi) d\xi dt, \quad \text{где } W(\xi) -$$

плотность вероятности значений распределения параметра  $\xi(t)$ .

Такой характеристикой качества СТД является коэффициент технического использования РЭС при наличии диагностирования и отсутствия такового или повышения значения коэффициента  $K_{\text{ТИ}}$  при внедрении СТД.

Таблица 3

## Параметры определения качества диагностирования

Вид контроля	$P_K t$	$f t$	$\lambda t$	$T$	$P_K \tau$	$K_K$
Без контроля	$1-Q F_0 t$	$Q\delta t + 1-Q f_0 t$	$\lambda_0 t$	$1-Q T_0$	$1-Q F_0 \tau$	0
Идеальный $K_{\text{ПО}} = 0$	$F_0 t$	$f_0 t$	$\lambda_0 t$	$T_0$	$F_0 \tau$	$QF'_0 \tau$ $1 - 1-Q F_0 \tau$
Реальный $K_{\text{ПО}} \neq 0$	$1-Q F_0 t$ $1-Q 1-K_{\text{ПО}}$	$QK_{\text{ПО}}\delta t + 1-Q f_0 t$ $1-Q 1-K_{\text{ПО}}$	$\lambda_0 t$	$1-Q T_0$ $1-Q 1-K_{\text{ПО}}$	$1-Q F_0 \tau$ $1-Q 1-K_{\text{ПО}}$	$1-Q QF_0 \tau \times$ $\times 1-K_{\text{ПО}} \times$ $\times 1-Q 1-K_{\text{ПО}} \times$ $\times -Q 1-K_{\text{ПО}} F_0 \tau$
Идеальный ПК $K_{\text{ПО}} = 0$ $K_{\text{П}\tau} = 0$	$1, t \leq \tau F_0 t ,$ $t > \tau F_0 \tau .$	$0, t \leq \tau f_0 t ,$ $t > \tau f_0 \tau .$	$0, t \leq \tau$ $\lambda_0 t ,$ $t > \tau$	$T_{\text{ПН}} = \tau + T/\tau$	1	1

#### 4. СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ

Процесс технического диагностирования включает в себя измерительные, контрольные и логические операции, выполняемые оператором и техническими средствами с целью определения действительного состояния ОД. При этом процесс диагностирования можно рассматривать (рис. 19) как сбор информации (И) о состоянии ОД и ее преобразование в преобразователе (ПИ) с дальнейшим документированием и анализом (ДА). Результаты оценки (Р) затем используются для принятия решения (ПР) о выполнении последующих операций или дальнейшем функциональном использовании РЭО. Не исключается возможность воздействия ( $B_1, B_2$ ) с целью уточнения диагноза или управления им в процессе диагностирования, что и определяет наличие обратных связей на рис. 19.

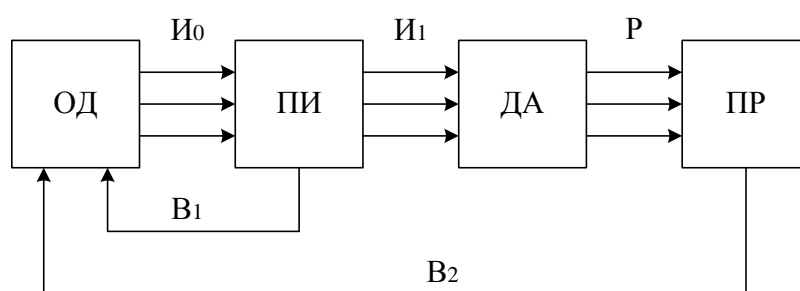


Рис. 19. Схема диагностирования

Средства технической диагностики и контроля относятся к категории информационно-измерительных систем (ИИС). Эти устройства своими параметрами по существу определяют все выходные показатели РЭС как ОД. СрД и К являются составной частью СТД, определяют эксплуатационно-технические характеристики этих систем.

Являясь неотъемлемой частью СТД, средства определяют контролепригодность РЭС, которая является свойством изделия, характеризующим его приспособленность к проведению контроля и диагностики заданными средствами.

Собственно СрД и К являются достаточно сложными РЭУ со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Не останавливаясь на принципах классифицирования средств диагностики и контроля приведем возможную структуру классификации СрД и К (рис. 20).

Основными параметрами СрД и К следует считать: точность измерения параметров РЭС, количественно определяемая погрешностью измерений ( $\sigma_H$ ), точность воспроизведения имитируемых сигналов, информационная производительность, инструментальная достоверность, разрешающая способность, степень автоматизации.

Точность средств измерений можно оценить мерой точности  $\varepsilon = 1 / \sigma_H \sqrt{2}$ , где  $\sigma_H$  – среднеквадратическая погрешность.

В общем случае:

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{\Pi}^2 + \sigma_H^2 + \sigma_K^2 + \sigma_{И\Pi}^2},$$

где  $\sigma_j$  – среднеквадратические погрешности преобразователей, нормализаторов, коммутаторов, измерительного прибора соответственно п, н, к, ип.

Производительность СрД и К может задаваться оперативной продолжительностью диагностирования или количеством объектов РЭС, диагностируемых за заданный временной интервал Т:

$$N_d = T/\tau_{di}.$$

#### 4.1. Средства контроля

При проведении диагностирования и контроля РЭС используются следующие средства:

1. Измерительные приборы общего назначения.
2. Встроенные средства диагностики и контроля.
3. Имитаторы сигналов РЭС.
4. Стенды для регулировки и испытания РЭО.
5. Автоматизированные средства диагностики и контроля.

Эти приборы достаточно подробно изучаются в предшествующих курсах, а поэтому более подробно рассмотрим последний, 5-й класс, так как он представляет наибольший интерес ввиду особенностей современных и перспективных РЭС ГА, широко использующих цифровую элементную базу и комплексирование информации.

#### 4.2. Автоматизация средств контроля технического состояния РЭО

Метод ТЭ РЭО по состоянию предполагает накопление с помощью средств контроля и обработку текущей информации в целях постоянного обеспечения обслуживающего персонала рекомендациями о принятии необходимых мер по обеспечению заданного уровня функционирования системы. Создание таких СрД и К стало возможным благодаря широкому развитию и использованию микропроцессорной техники на основе интегральной технологии.

Требование к аппаратуре контроля и диагностики определяются следующими факторами:

- сложностью современных РЭС; такие ОД требуют более полных и детальных проверок, что связано с необходимостью увеличения в СТД контрольных точек или разработки новых методов контроля и диагностики;
- временными ограничениями на интервал проверки; при создании алгоритмов ПМО, обработки информации и аппаратуры контроля и диагностики сложной системы важным фактором является время выполнения этих процедур обслуживания, требования к которому зависят от стадий жизненного цикла;
- полнотой контроля; требование к полноте контроля (количество и глубина проверок) зависят от стадий разработки и эксплуатации РЭО и должны учитываться в каждом конкретном случае;

- надежностью системы контроля и диагностики;
- временем восстановления системы; этот фактор зависит от метода эксплуатации оборудования, места проведения восстановительных и (или) ремонтных работ, количества запасных элементов и квалификации обслуживающего персонала;
- окружающей среды, определяющей конструкцию аппаратуры контроля и диагностики системы;
- экономической целесообразностью аппаратуры контроля и диагностики; этот фактор определяет структуру и состав СрД и К.

Выполнить поставленные требования возможно только при применении в аппаратуре контроля и диагностики современных средств вычислительной техники.

В зависимости от характера решаемых задач в автоматизированных средствах контроля и диагностики современных РЭС используется соответствующая вычислительная техника, которая на современном уровне развития позволяет обеспечить требования к автоматизированным средствам диагностики и контроля по универсальности, адаптации к различным системам РЭО (и не только РЭО), обнаружения места отказа с точностью до сменного функционального элемента системы, выдаче в результате анализа данных контроля и диагностики необходимых рекомендаций по техническому обслуживанию. Классификация средств диагностики и контроля приведена на рис. 21.

Современные автоматизированные СрД и К по характеру взаимодействия с РЭО делятся на активные и пассивные.

Активные автоматизированные СрД и К (тестовые средства) в соответствии с алгоритмом тестовой программы формируют стимулирующие сигналы, подаваемые на проверяемую систему с целью получения от нее ответной информации согласно задачам диагностики и контроля. Тестовые сигналы могут подаваться на РЭС как в процессе ее функционирования, так и в моменты времени использования системы не по назначению.

В пассивных автоматизированных СрД и К (средства функционального контроля и диагностики) отсутствуют тестовые сигналы (стимулирующие воздействия). Эти средства регистрируют информацию о состоянии  $S_i$  РЭО в процессе его функционирования.

Типовая структура автоматизированных средств функционального контроля и диагностики технического состояния РЭС, состоящей из сменных блоков  $B_1, B_2, \dots, B_n$  представлена на рис. 22. Каждый сменный блок ( $B_n$ ) содержит встроенные средства контроля и диагностики (ВСКн). Контролируемые параметры сменного блока поступают непрерывно или по запросу на общие средства диагностики и контроля (ОСКД).

Для непрерывной системы ВСК задают предельные допустимые значения контролируемых параметров и сравнивают их с измеренными значениями. ВСК





Рис. 21. Классификация средств диагностики и контроля

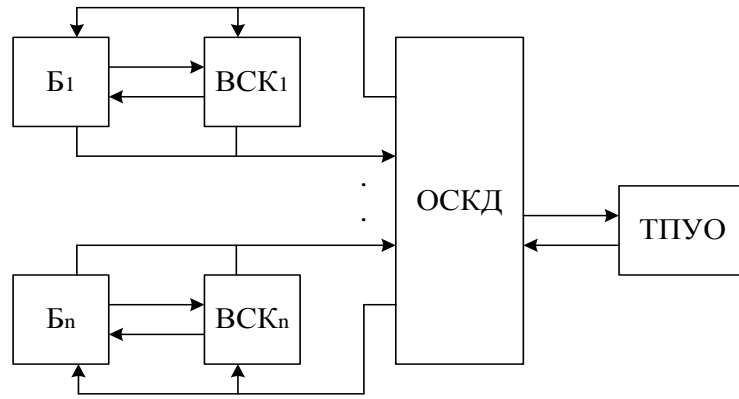


Рис. 22. Структура функционального контроля и диагностики непрерывной системы

В зависимости от характера взаимодействия между РЭС и СрД и К различают два типа устройств связи: без обратной связи по воздействию – в пассивных средствах контроля (рис. 23а); с обратной связью, по воздействию – в активных средствах контроля (рис. 23б).

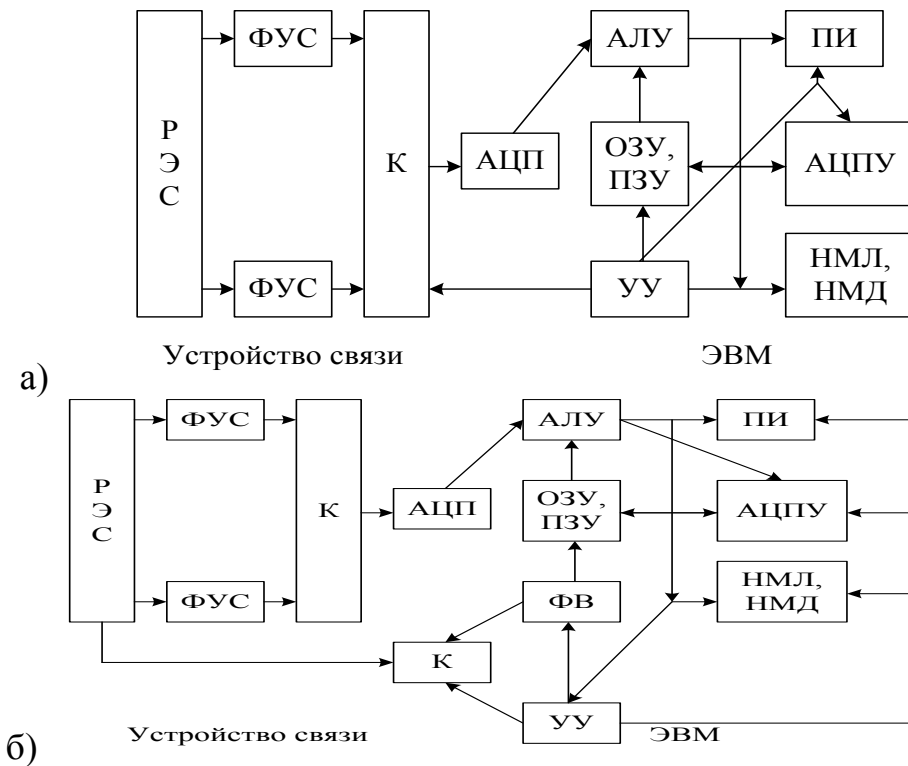


Рис. 23. Структура автоматизированных СрД и К:

а – пассивных, б – активных; К – коммутатор; ФУС – формирователь унифицированных сигналов; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ФВ – формирователь воздействий; ПИ – панель индикации; А – дисплей; АЦПУ – алфавитно-цифровое печатающее устройство; НМД – накопитель на магнитном диске; УУ – устройство управления; АЛУ – алфавитно-логическое устройство



В устройствах измерительной части без обратной связи стимулирующее воздействие на РЭС остается в процессе контроля неизменным или изменяется независимо от информации о состоянии системы. В устройстве измерительной части с обратной связью тестовые воздействия состоят из воздействий, которые не зависят от информации о системе и воздействий, зависящих от информации о состоянии системы. Автоматизированные (автоматические) средства диагностики и контроля на микропроцессорах позволяют удовлетворить требования в отношении универсальности, надежности и т. д. Многопроцессорные Срд и К обладают высокой производительностью, универсальностью и легко адаптируемы к различным видам оборудования. Линии сигналов, используемых в каналах общего пользования в автоматизированных комплексах диагностирования и контроля носят название "шина". Возможная структура комплекса автоматизированной СТД, в которой межприборные интерфейсные связи организованы по схеме "звезды", изображена на рис. 24. Измерительные приборы, подключаемые к ОД, работают в режиме автоматических измерений. Центральным интерфейсом является цифровой коммутатор (К). С выхода цифрового измерительного прибора (ЦИП) код измерений ДП  $U_i$  поступает на один из выходов К. Коммутатор поочередно подключает ЦИП, принимает от них код ЗП и передает этот код в аппаратуру обработки и управления (АОУ). Каждый ЦИП через время  $T_i$  (интервал измерений) обновляет информационный код на выходе. При  $m$  контролируемых параметров ДП полный цикл одного измерения

$$t_{\text{изм}} = \sum_{i=1}^m T_i + t_{\text{обр}},$$

где  $t_{\text{обр}}$  – время обработки информации.

Динамическая погрешность измерения по каждому из параметров определяется с учетом скорости изменения параметра  $dU_i/dt$  по формуле:

$$\delta U_i = \frac{dU_i}{dt} t_{\text{изм}}.$$

Если коммутатор обеспечивает ЦИП с необходимой скоростью, то выполняется условие:  $\frac{dU_i}{dt} t_{\text{изм}} < \delta U_{i\text{доп}}$ .

Период минимальной смены информации от самого быстродействующего прибора, определяющий время ввода, вычисляется, исходя из соотношения:

$$T_{\text{ВВ}} \geq \tau_K m (1 + \bar{p}),$$

где:  $\tau_K$  – время сквозной передачи одного кода информации в коммутаторе, то есть его быстродействие;  $m$  – количество каналов;  $\bar{p} = p_1 + p_2 + \dots + p_m$ ;  $p_i$  – вероятность сбоя в  $i$ -м канале.

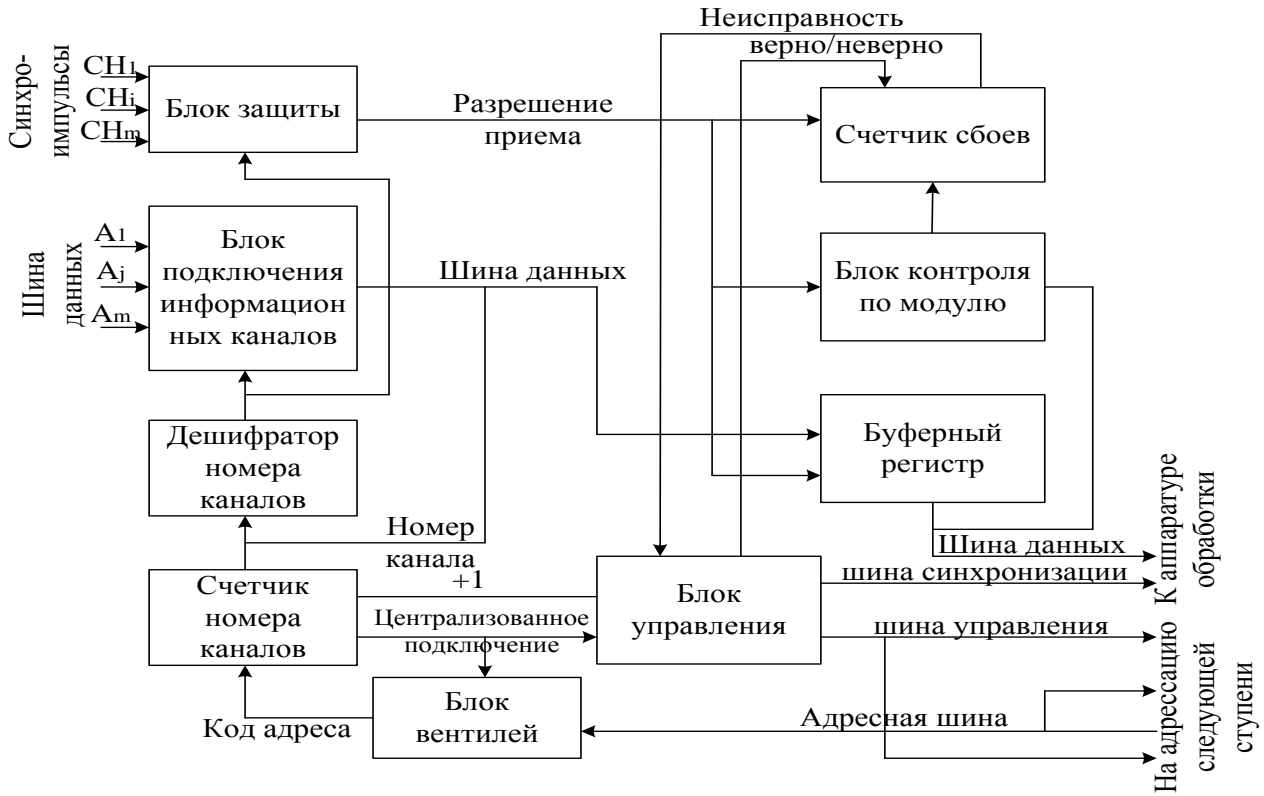


Рис. 24. Структура многоканальной автоматизированной СТД

Соответственно  $t_{\text{изм доп}}$  может быть определено из соотношения:

$$dU_{\text{доп}} = t_{\text{изм доп}} \frac{dU_i}{dt}_{\text{max}} \geq \frac{dG_i}{dt}_{\text{max}} \tau_K m 1 + \bar{p}.$$

### 4.3. Структура программного обеспечения автоматизированных систем диагностики и контроля РЭО

Техническое обеспечение современной СТД РЭО является аппаратной частью автоматизированных средств контроля и диагностики. Программное обеспечение (ПО) состоит из общего программного обеспечения и специального программного обеспечения (ОПО и СПО). ОПО – это совокупность программ, обеспечивающих выполнение программ СПО, их разработку, а также управление средствами контроля и диагностики в различных режимах работы. СПО – это совокупность программ, обеспечивающих контроль и диагностирование РЭС, самоконтроль, диагностирование и техническое обслуживание собственно средств диагностики и контроля.

В практике эксплуатации СрД и К существуют два основных подхода к созданию ОПО:

- построение ОПО на основе программного обеспечения используемой в них ЭВМ;
- создание ОПО средств диагностики и контроля.

ПО ЭВМ СрД и К рассматривается как вспомогательное и используется

для создания и обеспечения функционирования специализированного ОПО, ориентированного на задачи контроля и диагностики; в таком ОПО учитываются потребности эксплуатационного персонала.

Средства автоматизации программирования представляют собой совокупность языков и программ различного назначения для автоматизации этого программирования. Это является функцией базового программного обеспечения.

Разработке программ контроля и диагностирования РЭО предшествует анализ методик проверки параметров аппаратуры и методик диагностирования. При анализе всегда можно выделить группы параметров, проверяемых в близких исходных режимах функционирования РЭС, и оформить их как этапы проверки. Поэтапный контроль и диагностирование оборудования позволяет уплотнить время контроля группы родственных параметров за счет уменьшения времени на переходные процессы в РЭС, сократить объем программы исключением одних и тех же команд и сигналов на разных участках программы, обеспечить выборочный контроль и диагностирование четким определением этапа.

Наиболее рациональной представляется модульная структура программ контроля и диагностики, позволяющая упростить разработку программ и модернизировать имеющиеся за счет готовых модулей. Программа диагностирования непосредственно СрД и К обеспечивает локализацию и ПМО неисправностей в самой системе. При этом различают следующие виды контроля:

1. Аппаратурный контроль – дублирование, кодовый, система остаточных классов, корректирующие коды, аппаратурно-микропрограммный контроль.
2. Программный контроль – алгоритмический, логический, тестовый.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. - М.: Радио и связь,1988.
2. Логвин А.И., Епифанцева Д.А. Учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы по дисциплине «Надежность и техническая диагностика». - М.: МГТУ ГА, 2008. –Ч. II.
4. Емельянов В.Е. Техническая диагностика авиационного радиоэлектронного оборудования. - М.: МГТУ ГА,1998.
5. Мозгалеvский А.В., Гаспаров Д.В. Техническая диагностика. - М.: Радио и связь,1985.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ.....	3
1.1. Предпосылки использования средств диагностики и контроля....	3
1.2. Система технического диагностирования и контроля.....	6
1.3. Диагностические модели.....	7
1.3.1. Аналитические модели.....	7
1.3.2. Графоаналитические модели.....	9
1.3.3. Информационная диагностическая модель.....	12
2. КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЭО В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	16
2.1. Выбор допусков на диагностические параметры.....	16
2.2. Поиск места отказа в системах РЭС.....	18
2.2.1. Метод поиска места отказа путем поэлементной проверки	18
2.2.2. Метод поиска отказа по критерию «время-безотказность»..	18
2.2.3. Метод ветвей и границ.....	19
2.2.4. Метод половинных разбиений.....	20
2.2.5. Оптимизация алгоритма ПМО на основе иформационного подхода.....	21
2.3. Прогнозирование состояния РЭО.....	23
2.3.1. Аналитическое прогнозирование.....	25
2. 3. 2. Вероятностное прогнозирование.....	27
2. 3. 3. Статистическая классификация.....	29
3. ПОКАЗАТЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ.....	31
3.1. Показатели диагностирования.....	32
3.2. Показатели контролепригодности.....	35
3.3. Расчет показателей диагностирования.....	37
3.3.1. Ошибки в тракте диагностирования.....	37
3.3.2. Аналитический и графоаналитический расчет показателей диагностирования.....	39
3.4. Качество диагностирования.....	40
4. СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ.....	45
4.1. Средства контроля.....	46
4.2. Автоматизация средств контроля технического состояния РЭО	46
4.3. Структура программного обеспечения автоматизированных систем диагностики и контроля РЭО.....	52
Литература .....	54