

## 6 МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ, УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

### 6.1. Определение условий работоспособности

Оборудование систем автоматизации технологических объектов добычи, транспорта и переработки нефти и газа состоит из конечного числа элементов, и в нем может возникнуть конечное число дефектов. Это позволяет считать, что оборудование систем автоматизации может находиться в конечном множестве состояний  $S$ , которое состоит из подмножества работоспособных состояний  $S_1$  и подмножества неработоспособных состояний  $S_2$ . Разделение множества  $S$  на подмножества  $S_1$  и  $S_2$  определяется условием работоспособности.

Состояние оборудования систем автоматизации характеризует совокупность диагностических показателей, т. е. можно говорить о *векторе состояний*, компонентами которого будут диагностические показатели. При этом условие работоспособности задают в пространстве диагностических показателей *областью работоспособности*, исходя из следующих предположений:

- определен вектор состояний технологического оборудования, т.е. совокупность диагностических показателей;
- существует номинальный вектор состояний;
- отклонения вектора состояний (его компонент) от номинального допускаются только в определенных пределах;
- допустимые отклонения компонент вектора состояний (диагностических показателей) определяет область работоспособности оборудования.

В состав оборудования систем автоматизации входят как непрерывные, так и дискретные объекты, условия работоспособности которых формулируют по-разному.

Условия работоспособности непрерывных объектов задают неравенствами, которые ограничивают с одной или с двух сторон значения диагностических показателей:

$$\left. \begin{array}{l} \xi_i > \xi_{iH}, \xi_i < \xi_{iB} \\ \text{или} \\ \xi_{iH} \leq \xi_i \leq \xi_{iB}, i = \overline{1, k} \end{array} \right\},$$

где  $\xi_i$  — текущее значение;  $\xi_{iH}, \xi_{iB}$  — нижнее и верхнее допустимые значения диагностических показателей.

При этом вектор состояния оборудования имеет следующий вид:

$$S = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k).$$

В качестве компонент вектора состояний можно рассматривать как показатели, определяющие форму характеристики, так и физические параметры.

Задачу определения работоспособности непрерывных объектов сводят к проверке неравенств. Если хотя бы одно из неравенств не выполнено, объект признают неработоспособным.

Если в качестве диагностических показателей рассматривают характеристики оборудования  $y = f(x)$ , где  $x$  и  $y$  — входная и выходная переменные, то условия работоспособности определяют степень отклонения текущей характеристики объекта от номинальной

$$\rho_p(f, \varphi) = \left[ \int_a^b |f(x) - \varphi(x)|^p dx \right]^{1/p},$$

где  $\varphi(x)$  и  $f(x)$  — текущая и номинальная характеристики;  $p > 0$  фиксированный параметр.

В частном случае, когда  $p = \infty$ ,

$$\rho(f, \varphi) = \sup_{x \in (a, b)} |f(x) - \varphi(x)|,$$

т. е. оценивают наибольшее отклонение характеристик. Тогда условия работоспособности будут  $\rho_p(f, \varphi) \leq \varepsilon$  или  $\rho(f, \varphi) \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — допустимое отклонение.

Если характеристики оценивают по точкам (рисунок 6.1), то задают области допустимых отклонений для ограниченной совокупности точек на рабочем участке характеристики  $x \in (a, b)$ , а условия работоспособности — в виде неравенств  $|f(x_i) - \varphi(x_i)| < \varepsilon_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ . Если неравенства справедливы для всей совокупности рассматриваемых точек характеристики, то объект признают работоспособным.

Дискретный объект при определении его работоспособности (рис. 6.2) рассматривают как преобразователь вектора входных воздействий  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  в выходной вектор  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ , где  $x_i$  и  $y_i$  — значения сигналов на соответствующих входе и выходе;  $n$  и  $m$  — числа входов и выходов объекта.

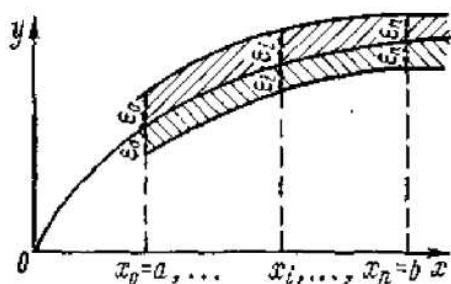


Рисунок 6.1 – Оценка характеристики по точкам

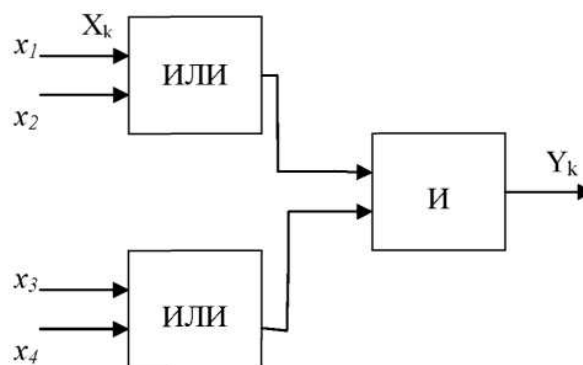


Рисунок 6.2 – Схема дискретного комбинационного объекта

Поскольку каждому входному вектору  $X_k$  соответствует определенный выходной  $Y_k$ , условием работоспособности дискретного объекта будет соответствие всех возможных входных векторов  $X_k$  выходным  $Y_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ).

При функциональном диагностировании величина  $N$  равна числу входных векторов (рабочих воздействий), а при тестовом  $N$  определяют, исходя

из условия обеспечения срабатывания всех элементов в объекте. В связи с этим при функциональном диагностировании необходимо выбрать моменты времени, когда следует проверять условие работоспособности, т. е. определять соответствие между входным и выходным векторами, сравнивая выходной вектор с эталонным. При тестовом диагностировании для проверки условий работоспособности необходимо построить минимальную входную последовательность векторов, обеспечивающую оценку состояния всех элементов объекта.

## 6.2. Степень работоспособности

Обычно допускают некоторый разброс параметров и характеристик технических объектов. Это объясняется, с одной стороны, неточностью изготовления элементов, с другой – самой постановкой задачи, поскольку на практике оказывается допустимой некоторая неточность в выполнении рабочих функций. Для проверяемых показателей (параметров и характеристик) устанавливают опытом или расчетом эксплуатационные допуски. Таким образом, вводят понятие области работоспособности и рассмотрение подмножества работоспособных состояний  $S_1$ . Однако не все состояния в подмножестве  $S_1$  равноценны. Можно предположить, что чем дальше состояние  $s_j$  от границ области работоспособности, тем меньше вероятность того, что объект потеряет работоспособность в ближайшее время. Удаление значения показателя от границы области работоспособности как бы увеличивает *запас работоспособности* или повышает *степень работоспособности* объекта. Наоборот, приближение значения диагностического показателя к границе этой области уменьшает запас и снижает степень работоспособности объекта. Для определения степени работоспособности область работоспособности разбивают на ряд подобластей и задают следующие условия (рис. 6.3).

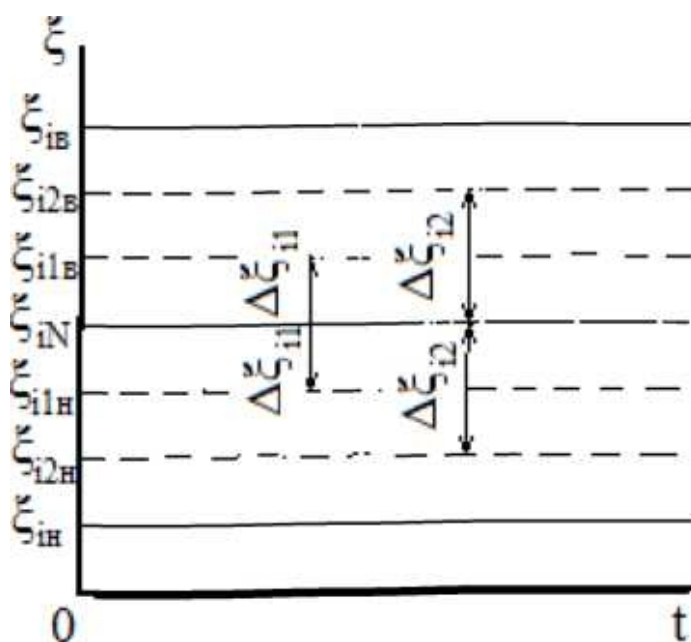


Рис. 6.3. Определение работоспособности

$$\left. \begin{array}{l} \xi_{iN} - \Delta \xi_{ij} \leq \xi_{iN} + \Delta \xi_{ij} \\ \text{или} \\ \xi_i > \Delta \xi_{ijN}; \xi_i < \Delta \xi_{ijS}, \end{array} \right\}$$

где индекс  $j$  характеризует степень работоспособности.

Чтобы ввести понятие степени работоспособности, необходимо дать количественную оценку. Подобную оценку произвести достаточно просто для объекта, состояние которого определяет один диагностический показатель, введя величину, изменяющуюся от 0 до 1,

$$C_i(t, R) = |\xi_i(t, R) - \xi_{ir}| / \Delta \xi_i,$$

где  $\Delta \xi_i$  — половина допуска на  $i$ -й показатель;  $\xi_i(t, R)$  и  $\xi_{ir}$  — текущее и граничное допустимые значения;  $R$  — режим работы объекта;  $t$  — время.

### 6.3. Методы определения работоспособности непрерывных объектов

Работоспособность непрерывных объектов при функциональном и тестовом диагностировании определяют, оценивая реакцию объекта на рабочие или специальные входные воздействия или оценивая качество выпускаемой продукции. Кроме того, судить о работоспособности объекта можно по алгоритму функционирования или по внешним и косвенным признакам.

Наиболее распространены методы, основанные на оценке реакции объекта на входные воздействия по динамическим и статистическим характеристикам. При этом характеристики оценивают целиком или в одной или нескольких характерных точках.

При оценке статической характеристики, как правило, выбирают совокупность наиболее характерных точек и проверяют соотношение  $k_i$  входных и выходных сигналов в этих точках в установившемся режиме. Работоспособность объекта определяют, сравнивая текущие значения  $k_i$  с верхней  $k_{\text{вн}}$  и нижней  $k_{\text{ни}}$  границами области работоспособности. Если  $i > 1$ , то объект считают работоспособным только при условии, что все диагностические показатели находятся в областях работоспособности (в допустимых пределах изменения).

Работоспособность объекта по динамической характеристике оценивают, сравнивая реакции объекта  $y$  и эквивалентной модели  $y_{\text{э*м}}$  на один и тот же входной сигнал  $x$  (рис. 6.4). В качестве показателя оценки работоспособности объекта принимают

$$y_k = \int_0^{\infty} \delta^2(t) dt,$$

где  $\delta(t) = y(t) - y_{\text{э*м}}(t)$ . При определении работоспособности проверяют условие  $\delta(t) \leq \delta_{\text{тр}}$ ,  $y_k(t) \leq y_{\text{ктр}}$ , где индекс «тр» означает требуемое значение.

Если ОД рассматривать как систему второго порядка, то на его динамическую (временную) характеристику в основном будет влиять пара комплексно-сопряженных полюсов. В этом случае о работоспособности ОД судят по коэффициенту затухания  $\xi$ , или по собственной частоте  $\omega_0$ . Технически это реализуют следующим образом (рис. 6.5, а).

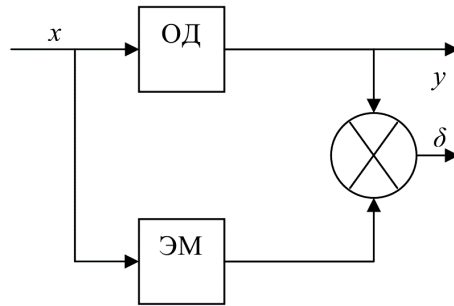


Рис. 6.4. Схема, реализующая метод эквивалентной модели

Если пропустить реакцию объекта на ступенчатый сигнал параллельно через фильтры  $Tp/(Tp + 1)$ ;  $1/(Tp + 1)$  ( $T = 1/\omega_0$ ) и двухполупериодные выпрямители ДПВ, а затем сравнить эти сигналы, то их равенство будет говорить о том, что  $\omega_0 = \omega_{0н}$ , т. е. объект работоспособен. В противном случае объект будет считаться неработоспособным. С другой стороны, если оценить колебательность (число колебаний) по временной импульсной переходной характеристике, то можно судить о величине коэффициента затухания Действительно, временная характеристика будет изменять знак в следующие моменты времени (рис. 6.5, б):

$$t_i = m\pi / (\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}), m=1, 2, \dots$$

При  $\omega_0 = const$  каждый момент времени определяется величиной  $\zeta$ .

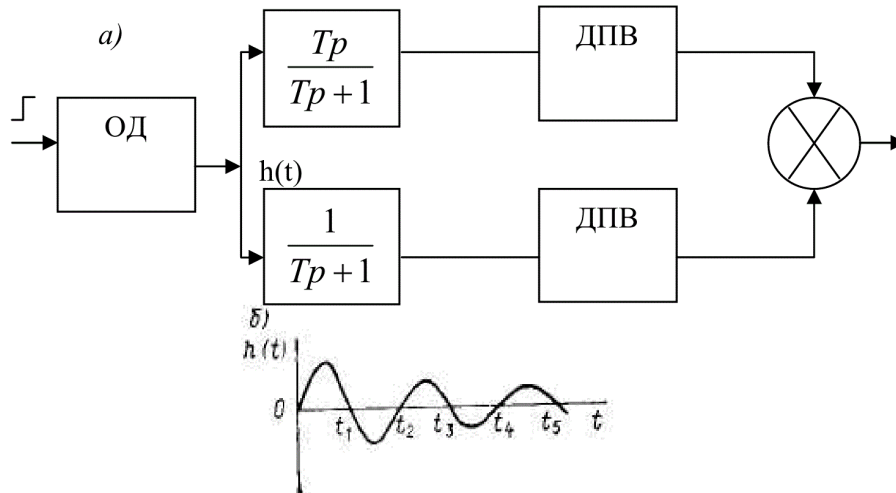


Рисунок 7.5 – Схема (а), реализующая метод определения работоспособности по временной характеристике (б)

Если объект диагностирования сложный, т. е. состоит из нескольких структурных единиц, связанных между собой (рис. 6.6), то его работоспособность оценивают по работоспособности структурных элементов. Используя приведенные выше методы, можно оценить по выходу каждой структурной единице его работоспособность и считать, что ОД работоспособен, если работоспособны все структурные единицы. Тогда работоспособное состояние объекта представляют четырёхмерным вектором  $S = (1, 1, 1, 1)$ , где каждая компонента равна 1 при работоспособности структурная единица (если структурная единица неработоспособна, то её состояние оценивают 0).

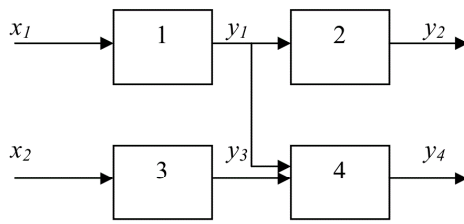


Рисунок 6.6 – Схема объекта, состоящего из нескольких структурных единиц

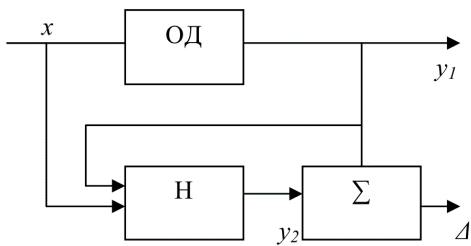


Рисунок 6.7 – Схема, реализующая метод избыточных переменных

При функциональном диагностировании работоспособность сложного объекта оценивают методом *формирования избыточных переменных*. В этом случае рассматривают кроме выходных сигналов объекта и его СЕ  $Y_1=(y_1, y_2, \dots, y_n)$  дополнительные сигналы  $Y_2=(y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_{n+k})$ , с помощью которых формируется показатель  $\Delta=y_1+y_2+\dots+y_n+y_{n+1}$ , равный нулю независимо от входного сигнала, если состояние объекта не изменяется.

Число дополнительных сигналов  $k$ , которые должны формироваться специальным блоком  $H$  (рис. 6.7) при заданной чувствительности проверки функционирования  $\rho_k$ , определяют по формуле

$$k \geq n\rho_k^2 / (1 - \rho_k^2),$$

где  $\rho_k$  показывает, насколько отклонение диагностического показателя должно превышать его номинальное значение для достоверной проверки.

Существует еще ряд способов определения работоспособности непрерывных объектов при функциональном и тестовом диагностировании, но все они сводятся к непосредственной оценке характеристик объекта по точкам или к вычислению коэффициентов диагностических моделей, которыми описывают ОД.

#### 6.4. Поиск возникшего дефекта

Поиск возникшего дефекта в отличие от определения работоспособности, как правило, требует более детального анализа ОД или его модели. При этом степень детализации определяет заданная глубина поиска дефекта, т.е. указание части объекта (структурной единицы), с точностью до которой находят место дефекта. Таким образом, если задана глубина поиска возникшего дефекта, то ОД можно представить множеством из взаимосвязанных частей. При поиске возникшего дефекта каждую структурную единицу рассматривают как единое целое, и она может находиться в двух состояниях: «в структурной единице имеется дефект» или «в структурной единице дефект отсутствует». Общее число состояний, в которых может находиться объект, состоящий из  $N$  структурных единиц, равно  $N + 1$  (одно состояние соответствует отсутствию дефектов в объекте). Следовательно, в предположении, что в объекте одновременно может отказать только одна структурная единица, при поиске дефектов необходимо рассматривать множество, или пространство, из  $N$  состояний.

Поиск дефекта или состояния, в котором находится объект, выполняют по алгоритму, включающему определенную совокупность проверок. При этом *проверкой*  $\pi$  называют оценку состояния структурной единицы по её выходу или выходу объекта. Множество состояний в общем случае больше множества проверок, поскольку при выполнении одной проверки можно найти больше одного дефекта. Каждая проверка требует определенных затрат. При построении алгоритма поиска дефекта стараются выбрать такую последовательность проверок, чтобы найти дефект с наименьшими затратами.

Поскольку каждая проверка делит пространство состояний на две части (включающую и не включающую искомое состояние), то результатом выполнения последовательности проверок будет обнаружение структурной единицы, в которой возник дефект. Последовательность проверок или процедуру поиска можно представить графически в виде дерева поиска, где вершинами будут проверки, а ветви указывают последовательность их выполнения. Различают деревья поиска трех видов: последовательные, параллельные и комбинированные.

При *последовательном* поиске каждая проверка выделяет в пространстве поиска одно состояние. На рис. 6.8 приведены все возможные деревья, соответствующие последовательному поиску при числе различных состояний  $N = 4$ . В общем случае число деревьев при последовательной процедуре  $M = 2^{n-2}$ .

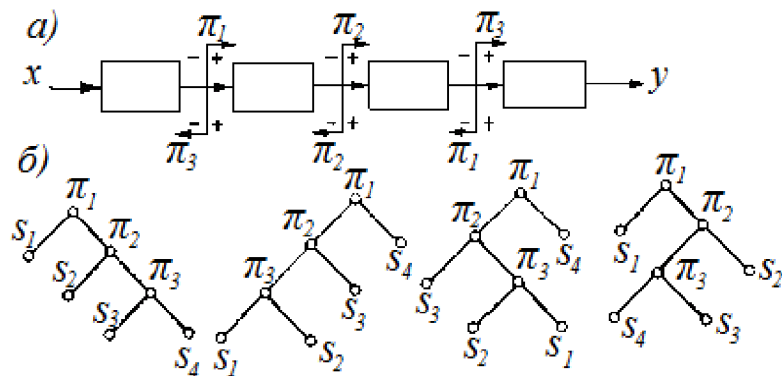


Рисунок 6.8 – Схема ОД (а) и деревья последовательного поиска (б)

При *параллельном* поиске пространство состояний разбивают проверкой на две равные или почти равные части (рис. 6.9, а). Число возможных деревьев в общем случае

$$M = C_{2^k}^{n-2^k},$$

где  $k = [\log_2 n]$  – целая часть  $\log_2 n$ .

*Комбинированный* поиск представляет собой сочетание последовательных и параллельных процедур (рис. 6.9, б).

Деревья поиска можно построить на основе анализа структуры объекта или используя показатели, определяющие надежность структурной единицы. Деревья поиска дефектов характеризуют суммарной длиной ветвей:

$$L = \sum_{j=1}^n l_j,$$

где  $l_j$  – длина  $j$ -й ветви.

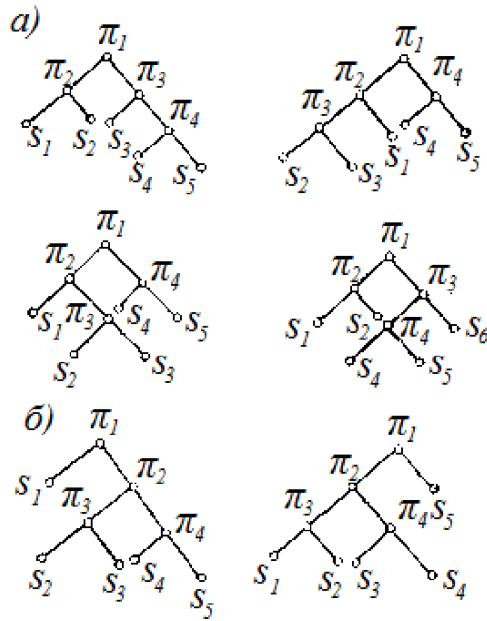


Рисунок 6.9 Деревья параллельного (а) и комбинированного (б) поиска дефектов для объекта из пяти элементов

Для последовательного поиска

$$L_{nc} = \sum_{j=1}^n l_j^{nc} = C_{n-1}^2 + 2(n-1),$$

для параллельного поиска

$$L_{np} = \sum_{j=1}^n l_j^{np} = \sum_{i=1}^{n-1} \log_2 j - 2(n-1).$$

Суммарная длина ветвей дерева комбинированного поиска заключена между этими значениями

$$\sum_{j=1}^n l_j^{np} < \sum_{j=1}^n l_j^{кб} < \sum_{j=1}^n l_j^{nc}.$$

### 6.5. Алгоритм поиска дефекта

*Алгоритм диагностирования* – совокупность элементарных проверок в контрольных точках системы и правил, устанавливающих последовательность их проведения, а также анализ результатов этих проверок, по которым можно определить исправное, работоспособное или состояние правильного функционирования от неисправного состояния и уметь отличать дефекты от неисправного состояния.

Последовательность выполнения проверок строят на основании известных значений вероятности отказа структурной единицы. В простейшем случае алгоритм поиска можно представить последовательной процедурой. Чтобы реализовать эту процедуру, структурные единицы объекта, для которых заданы вероятности отказа  $q_i$  упорядочивают по величине, затем выполняют проверки начиная со структурной единицы, характеризуемой наибольшим и заканчивая структурной единицей, характеризуемой наименьшим значением  $q_i$ .



При построении алгоритма поиска, обеспечивающего наименьшие затраты, предполагают, что длительности всех проверок равны, отказы структурных единиц независимы; отказывает только одна (любая) структурная единица.

Последовательность действий при построении алгоритма следующая:

1 Для каждой  $i$ -й структурной единицы определяют вероятность отказа  $q_i$ .

2 Все СЕ располагают в порядке убывания  $q_i$ .

3 Последние две структурные единицы объединяют в одну условную СЕ, вероятность отказа которой  $q = q_n + q_{n-1}$

4 Условную структурную единицу устанавливают на соответствующее место в ряду по величине  $q$ .

5 Процесс продолжают до тех пор, пока все структурные единицы не будут объединены в одну условную структурную единицу.

Алгоритм поиска возникшего дефекта представляет собой последовательность выполнения проверок, обратную полученной.

Эффективность диагностирования оценивается качеством алгоритмов диагностирования и качеством средств диагностирования. Средства диагностирования разделяют, прежде всего, на программные и аппаратные, а также внешние (конструктивно выполненные отдельно от системы) и встроенные являющиеся составной частью системы); ручными, автоматизированными и автоматическими; специализированными и универсальными.