АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГИБКОЙ ПРОГРАММЫ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ПО КРИТЕРИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Е.В. Копкин, доктор технических наук;
В.В. Деев, доктор технических наук, профессор.
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Предлагается алгоритм построения гибкой программы анализа технического состояния объекта по критерию эффективности получаемой информации при использовании непрерывных диагностических признаков. Эффективность информации вычисляется как отношение ее ценности к количеству. Приводится числовой пример реализации алгоритма.

Ключевые слова: анализ технического состояния, ценность информации, эффективность информации, диагностический признак

ALGORITHM OF CONSTRUCTION OF FLEXIBLE PROGRAM ANALYSIS OF THE OBJECT TECHNICAL STATE BY THE INFORMATION EFFICIENCY CRITERION

E.V. Kopkin; V.V. Deev. Military Space Academy by name of A.P. Mozhaisky

The algorithm of construction of flexible program analysis of the object technical state by the efficiency criterion of information is offered. The continuous diagnostic signs are used. The information efficiency is calculated as the ratio of its value to its quantity. A numerical example of the algorithm implementation is given.

Keywords: technical state analysis, information value, information efficiency, diagnostic signs

В составе современных сложных технических объектов, как правило, имеются информационно-измерительные системы, которые представляют собой совокупность аппаратно-программных средств для получения информации, характеризующей техническое состояние (ТС) объекта путем измерения ряда его параметров (признаков) и анализа измеренных значений по специальным алгоритмам.

Для построения автоматизированных систем анализа ТС подобных объектов необходима разработка диагностических алгоритмов математического обеспечения информационно-измерительных систем. Реализация этих алгоритмов осуществляется с помощью программного компонента информационно-измерительных систем, а именно – гибких программ анализа (ГПА), которые позволяют автоматизировать процесс анализа ТС объектов и решают две основные задачи – контроль правильности функционирования объекта и поиск дефектов в нем с заданной глубиной в случае потери объектом своей работоспособности.

Процесс анализа ТС объекта можно рассматривать как управляемый с помощью проверок диагностических признаков динамический процесс стохастического типа с заданным правилом остановки. Целенаправленным выбором проверок можно гибко изменить этот процесс, придавая ему желаемые свойства, в том числе и оптимальные.

Анализируемый объект может случайным образом оказаться в одном из множества искомых состояний. Существует множество путей достижения цели, исходящих из начального состояния процесса анализа. При разных методах построения получаются разные варианты ГПА для одного и того же объекта. Для выбора наилучшего из этих вариантов используются различные критерии.

В частности, в работе [1] В.И. Корогодиным предложен показатель E эффективности информации в виде отношения ценности V информации к ее количеству I, то есть:

$$E = V/I. \tag{1}$$

Ценность информации В.И. Корогодин предложил определять в виде отношения:

$$V = \frac{P - p}{1 - p}, \tag{2}$$

где P и p представляют собой вероятности достижения цели при использовании получаемой информации и без ее использования соответственно. Количество информации определяется по известной формуле Шеннона [2].

Следует отметить, что ценность информации можно определять различными способами. Одним из первых, кто ввел понятие ценности (полезности) информации, был академик А.А. Харкевич [3]. Он определил ее как свойство информации изменять эффективность (результативность) инициированного ею процесса функционирования системы, в которой используется данная информация. Для таких систем определение ценной информации позволяет существенно сократить ее семантическую избыточность. В частности, А.А. Харкевичем предложено определять ценность получаемой информации через двоичный логарифм отношения вероятностей достижения цели управления после и до получения информации.

Обстоятельный анализ подходов к определению и вычислению ценности информации сделан в работе Г.П. Шанкина [4], который предложил аксиоматическое определение понятия «ценность информации» и разработал ряд математических моделей, позволяющих вычислять ценность информации, необходимой пользователю для достижения некоторой цели.

К настоящему времени публикации, связанные с построением программ анализа ТС объектов по показателю эффективности информации, отсутствуют. Поэтому разработка алгоритмов построения ГПА по критерию эффективности получаемой информации является актуальной и практически важной задачей.

Математическая постановка задачи

Для решения задачи воспользуемся математической моделью, описанной в работе [5], в соответствии с которой считаются заданными:

$\mathsf{S} = \left\{ S_i \mid i = \overline{1,m} \right\}$ – множество ТС, в одном из которых может находиться объект;

$\hat{\Pi} = \left\{ \hat{\pi}_j \mid j = \overline{1,n} \right\}$ – множество проверок, взаимно однозначно соответствующее множеству $\Pi = \left\{ \pi_j \mid j = \overline{1,n} \right\}$ диагностических признаков, на котором все ТС $S_i \in \mathsf{S}$ попарно различимы, то есть $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ есть проверка соответствующего признака $\pi_j \in \Pi$;

$L = \left\{ \ell_{ij} \mid i = \overline{1,m}; j = \overline{1,n} \right\}$ – множество интервалов ℓ_{ij} на вещественной числовой оси, каждый из которых характеризует возможный разброс j признака в i-м ТС;

$\Omega = \left\{ R \middle| R \subseteq \mathsf{S} \right\}$ – алгебра событий, заданных на множестве S, в которой элементы R играют роль информационных состояний (ИС) моделируемого процесса анализа.

Физически каждое ИС $R \in \Omega$ означает подмножество «подозреваемых» ТС, в одном из которых находится объект. Различают начальное ИС $R = \mathsf{S}$, промежуточные $R \subset \mathsf{S}$ и конечные состояния $R = \{S_i\}\left(i = \overline{1, m}\right)$. Каждое из конечных ИС содержит единственное «подозреваемое» состояние S_i, которое воспринимается как опознанное i ТС объекта. В дальнейшем конечные ИС будем обозначать $R_i = \{S_i\}$, где $i = \overline{1, m}$, а все остальные (неконечные) – $R_k \subseteq \mathsf{S}$ $(k = m+1,\ m+2,\ \ldots)$.

Функционирование ГПА заключается в получении и анализе информации о состоянии проверяемого объекта. При этом процесс анализа последовательно переходит из одного ИС $R_k \in \Omega$ в другое, содержащее меньшее число элементов S_i. Процесс переходов завершается при достижении одного из конечных состояний $R_i\left(i = \overline{1, m}\right)$, содержащих единственное состояние S_i, воспринимаемое как опознанное. Описанным процессом можно управлять, целенаправленно выбирая в каждом неконечном состоянии $R_k \subseteq \mathsf{S}$ проверку $\hat{\pi}_j$, которая должна принадлежать множеству $\hat{\Pi}_k$ допустимых в данном состоянии R_k проверок, определяемому из условия:

$$\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k, \text{если } \left(\exists\, S_i, S_f \in R_k\right) : \left(\ell_{ij} \cap \ell_{fj} = \varnothing\right). \tag{3}$$

Переход от одного состояния R_k к другому осуществляется с помощью отображения:

$$\hat{\pi}_j :\ R_k \to R_{kj}^{v}\ \left(v = \overline{1, \omega_{kj}}\right), \tag{4}$$

где $R_{kj}^{v} = \left\{S_i \,\middle|\, S_i \in R_k,\, y_j \in \Delta_{kj}^{v}\right\}$; $\Delta_{kj}^{v} = \bigcap\limits_{\left\{i:\, S_i \in R_{kj}^{v}\right\}} \ell_{ij}$; ω_{kj} – количество исходов проверки; v – порядковый номер исхода.

Результатом выполнения отображения (4), то есть исходом проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в состоянии R_k, является событие, заключающееся в попадании измеренного значения y_j признака π_j в подынтервал Δ_{kj}^{v} с вероятностью $P\left(y_j \in \Delta_{kj}^{v}\right)$, которую можно определить по формуле:

$$P\left(y_j \in \Delta_{kj}^{v}\right) = P_k\left(\hat{\pi}_j^{v}\right) = \frac{\left|\Delta_{kj}^{v}\right|}{\left|\nabla_{kj}\right|} = \frac{\left|\bigcap\limits_{\left\{i: S_i \in R_{kj}^{v}\right\}} \ell_{ij}\right|}{\left|\bigcup\limits_{\left\{i: S_i \in R_k\right\}} \ell_{ij}\right|}, \tag{5}$$

где $\left|\Delta_{kj}^{v}\right|$ и $\left|\nabla_{kj}\right|$ – длина пересечения и объединения интервалов соответственно.

Сущность алгоритма построения ГПА заключается в том, что в начальном ИС $R_k = \mathsf{S}$ и в каждом из последующих состояний $R_k \subset \mathsf{S}$ выбирается для проверки такой признак $\pi_j \in \Pi$, которому соответствует максимальное значение показателя E эффективности получаемой информации.

Составляемую программу будем представлять в виде ориентированного графа G, вершинами которого обозначаются ИС процесса анализа, а дугами – исходы проверок признаков в этих состояниях. Граф G состоит из ветвей $G_r \in U$ (r – порядковый номер ветви; U – множество всех ветвей), каждая из которых приводит к распознаванию конкретного ТС $S_i \left(i = \overline{1, m}\right)$, имеет одну начальную и m конечных (по числу возможных ТС объекта) вершин.

Вычисление показателя эффективности информации

Рассмотрим показатель эффективности информации (1), предложенный В.И. Корогодиным в работе [1], и модифицируем его для использования в рассматриваемой предметной области.

Обозначим показатель эффективности информации, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ в ИС R_k, через $E_k\left(\hat{\pi}_j\right)$ и будем определять его из отношения:

$$E_k\left(\hat{\pi}_j\right) = \frac{V_k\left(\hat{\pi}_j\right)}{I_k\left(\hat{\pi}_j\right)}, \tag{6}$$

где $V_k\left(\hat{\pi}_j\right)$ – ценность информации; $I_k\left(\hat{\pi}_j\right)$ – ее количество.

Каждое из информационных состояний $R_{kj}^v \subset R_k$, полученных в результате проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, выполненной в ИС R_k, включает в свой состав в общем случае несколько предполагаемых ТС $S_i \in \mathsf{S}$, в одном из которых может находиться объект анализа.

Для распознавания этих ТС необходима дополнительная информация, которая обладает некоторой ценностью. Эта информация может быть получена в результате выполнения последующих проверок.

Поскольку измеряемые значения y_j диагностических признаков $\pi_j \in \Pi$ равномерно распределены по интервалам $\ell_{ij} \in L$, то можно предположить, что для ИС $R_{kj}^v \subset R_k$, состоящего из нескольких элементов $S_i \in \mathsf{S}$, вероятности этих ТС будут одинаковыми.

Введем обозначение $\left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)}$, где τ – количество элементов, входящих в состав ИС R_{kj}^v. Тогда в качестве вероятности P в формуле (2) можно использовать вероятность события, заключающегося в том, что техническим состоянием объекта является $S_i \in \left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)}$. Обозначим эту вероятность через P_{kj}^i и будем вычислять ее по формуле:

$$P_{kj}^i = P\left(S_i \mid S_i \in \left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)}\right) = \frac{1}{\tau}. \tag{7}$$

Если ИС R_{kj}^v состоит только из одного ТС $S_i \in \mathsf{S}$, то есть $R_{kj}^v = \left(R_{kj}^v\right)^{(1)} = R_i = \left\{S_i\right\}$, то цель процесса анализа (распознавание конкретного ТС объекта) считается достигнутой, и в соответствии с формулой (7) вероятность P_{kj}^i становится равной единице.

Целью функционирования ГПА является распознавание конкретного ТС $S_i \in \mathsf{S}$, в котором находится объект. Следовательно, в качестве вероятности p в формуле (2) можно использовать вероятность того, что техническим состоянием объекта является $S_i \in R_k$. Обозначим эту вероятность через $P_{kj}\left(S_i\right)$.

При использовании диагностических признаков в непрерывной форме представления эти вероятности будут различными в зависимости от того, какая из проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ будет выполнена в ИС R_k.

В каждое из конечных ИС $R_i = \left\{S_i\right\} \left(i = \overline{1, m}\right)$ могут приводить несколько ветвей $G_r \in U$ гибкой программы анализа. Поэтому вероятность $P_{kj}\left(S_i\right)$ можно вычислить по формуле:

$$P_{kj}\left(S_i\right) = P\left(S_i \mid S_i \in R_k\right) = \sum_{v=\overline{1,\, \omega_{kj}};\; S_i \in \left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)}} \frac{1}{\tau} P_k\left(\hat{\pi}_j^v\right). \qquad (8)$$

Обозначим через $V_{kj}^v\left(S_i\right)$ ценность информации, получаемой при распознавании конкретного ТС $S_i \in R_{kj}^v$, и будем определять ее по формуле:

$$V_{kj}^v\left(S_i\right) = \frac{P_{kj}^i - P_{kj}\left(S_i\right)}{1 - P_{kj}\left(S_i\right)}. \qquad (9)$$

Поскольку ИС $R_{kj}^v \subset R_k$ в общем случае состоит из нескольких ТС $S_i \in \mathsf{S}$, то ценность информации, которая необходима для распознавания всех ТС $S_i \in R_{kj}^v$, определяется по формуле:

$$V_{kj}^v = \sum_{S_i \in R_{kj}^v} P_{kj}^i \cdot V_{kj}^v\left(S_i\right). \qquad (10)$$

Если ИС R_{kj}^v является конечным, то вычисления по формулам (9) и (10) дают следующие результаты: $V_{kj}^v\left(S_i\right) = 1$; $V_{kj}^v = 1$.

Для вычисления ценности информации $V_k\left(\hat{\pi}_j\right)$, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$ в ИС R_k, необходимо усреднить результаты, полученные при расчетах по формуле (10), по вероятностям реализации исходов этой проверки, используя формулу:

$$V_k\left(\hat{\pi}_j\right) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k\left(\hat{\pi}_j^v\right) \cdot V_{kj}^v. \qquad (11)$$

Следует также отметить, что для ИС R_k, состоящих только из двух ТС $S_i \in \mathsf{S}$, любая из допустимых проверок будет приносить информацию, обладающую максимальной ценностью, равной единице, поскольку в результате ее выполнения происходит гарантированное распознавание ТС, в котором находится объект, то есть цель анализа достигается.

Количество информации, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ в ИС R_k, определяется по формуле Шеннона:

$$I_k\left(\hat{\pi}_j\right) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k\left(\hat{\pi}_j^v\right)\left[-\log_2 P_k\left(\hat{\pi}_j^v\right)\right]. \qquad (12)$$

На каждом шаге функционирования ГПА выбирается наилучший для проверки признак согласно условию:

$$\pi_j = \arg\max_{\pi_s \in \Pi_k}\left\{E_k\left(\hat{\pi}_s\right)\right\}, \qquad (13)$$

где Π_k – подмножество допустимых для проверки признаков $\pi_j \in \Pi$, определяемое из условия (3).

Процедура построения гибкой программы анализа ТС объекта

Построение ГПА заключается в выполнении ряда последовательных шагов.

Шаг 1. В начальном ИС $R_k = \mathsf{S}$ выполним проверку $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$. Согласно отображению (4) получим ряд новых ИС $R_{kj}^v \left(v = \overline{1, \omega_{kj}}\right)$, а по формуле (5) определим вероятности $P_k\left(\hat{\pi}_j^v\right)$ исходов этой проверки.

По формуле (8) определим вероятности $P_{kj}\left(S_i\right)$ для каждого из ТС $S_i \in R_k$.

Для конечных исходов $R_{kj}^v = R_i = \left\{S_i\right\}$ положим: $P_{kj}^i = 1$; $V_{kj}^v\left(S_i\right) = 1$; $V_{kj}^v = 1$.

Для неконечных ИС $R_{kj}^v \neq R_i$ по формуле (7) определим вероятности P_{kj}^i, по формуле (9) – значения $V_{kj}^v\left(S_i\right)$, а по формуле (10) – V_{kj}^v.

Шаг 2. По формулам (11), (12) и (6) вычислим, соответственно, ценность $V_k\left(\hat{\pi}_j\right)$, информативность $I_k\left(\hat{\pi}_j\right)$ и эффективность $E_k\left(\hat{\pi}_j\right)$ проверки $\hat{\pi}_j$, выполненной в начальном состоянии $R_k = \mathsf{S}$.

Шаг 3. Выполним операции, предусмотренные шагами 1 и 2, для оставшихся проверок, получим для каждой из них значение показателя эффективности $E_k\left(\hat{\pi}_j\right)$.

Шаг 4. По условию (13) выберем для проверки в ИС $R_k = \mathsf{S}$ признак, обладающий максимальной эффективностью.

Шаг 5. Рассмотрим последовательно все неконечные ИС $R_{kj}^v \left(v = \overline{1, \omega_{kj}}\right)$, полученные в результате выполнения проверки признака, выбранного на шаге 4. Согласно условию (3) определим для каждого из этих ИС подмножества Π_k допустимых для проверки признаков.

Шаг 6. Выполним для ИС, рассмотренных на шаге 5, операции, предусмотренные шагами 1, 2 и 3; для каждой из допустимых проверок получим значение показателя $E_k\left(\hat{\pi}_j\right)$ и выберем признак с максимальной эффективностью.

Шаг 7. Описанную процедуру продолжим до получения всех конечных ИС $R_i = \left\{S_i\right\}, i = \overline{1, m}$.

В результате получим подмножества диагностических признаков, упорядоченные по очередности их проверки, для распознавания каждого из возможных ТС объекта с максимальной в среднем эффективностью.

Пример реализации алгоритма

Пусть заданы множества $\mathsf{S} = \left\{ S_i \mid i = \overline{1,5} \right\}$ ТС, в одном из которых может находиться объект, множество $\Pi = \left\{ \pi_j \mid j = \overline{1,5} \right\}$ диагностических признаков, а также множество $L = \left\{ \ell_{ij} \mid i = \overline{1,5};\ j = \overline{1,5} \right\}$ интервалов на вещественной числовой оси, характеризующих разброс измеренных значений признаков в различных ТС (табл. 1). Требуется построить ГПА ТС объекта, которая будет на каждом шаге функционирования программы выбирать признак, обладающий наибольшей эффективностью.

Таблица 1. **Таблица состояний анализируемого объекта**

ТС S_i	Диагностические признаки				
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5
S_1	(0,0; 0,4)	(0,2; 0,5)	(0,1; 0,3)	(0,0; 0,5)	(0,5; 1,0)
S_2	(0,2; 0,6)	(0,7; 1,0)	(0,3; 0,8)	(0,2; 0,6)	(0,0; 0,3)
S_3	(0,5; 0,8)	(0,0; 0,4)	(0,6; 1,0)	(0,4; 0,6)	(0,6; 0,8)
S_4	(0,6; 1,0)	(0,2; 0,7)	(0,4; 0,8)	(0,7; 1,0)	(0,3; 0,5)
S_5	(0,3; 0,5)	(0,6; 0,8)	(0,0; 0,3)	(0,5; 0,7)	(0,3; 0,7)

Рассмотрим начальное ИС $R_{1-5} = \left\{ S_1, \ldots, S_5 \right\}$. В этом состоянии все проверки являются допустимыми. Проверка $\hat{\pi}_1$ согласно отображению (4) дает следующие исходы:

$$\hat{\pi}_1 :\ R_{1-5} \quad \to \quad \begin{cases} R^1_{1-5;\,1} = \left\{ S_1 \right\} = R_1 \text{ , если } y_1 \in \left(0,0; 0,2 \right) = \Delta^1_{1-5;\,1}; \\ R^2_{1-5;\,1} = \left\{ S_1, S_2 \right\} = R_{1,2} \text{ ,если } y_1 \in \left(0,2; 0,3 \right) = \Delta^2_{1-5;\,1}; \\ R^3_{1-5;\,1} = \left\{ S_1, S_2, S_5 \right\} = R_{1,2,5} \text{ ,если } y_1 \in \left(0,3; 0,4 \right) = \Delta^3_{1-5;\,1}; \\ R^4_{1-5;\,1} = \left\{ S_2, S_5 \right\} = R_{2,5} \text{ , если } y_1 \in \left(0,4; 0,5 \right) = \Delta^4_{1-5;\,1}; \\ R^5_{1-5;\,1} = \left\{ S_2, S_3 \right\} = R_{2,3} \text{ , если } y_1 \in \left(0,5; 0,6 \right) = \Delta^5_{1-5;\,1}; \\ R^6_{1-5;\,1} = \left\{ S_3, S_4 \right\} = R_{3,4} \text{ ,если } y_1 \in \left(0,6; 0,8 \right) = \Delta^6_{1-5;\,1}; \\ R^7_{1-5;\,1} = \left\{ S_4 \right\} = R_4 \text{ , если } y_1 \in \left(0,8; 1,0 \right) = \Delta^7_{1-5;\,1}. \end{cases}$$

Вероятности этих исходов определим по формуле (5):

$$\left| \nabla_{1-5;1} \right| = \left| \bigcup_{v=1}^{7} \Delta^v_{1-5;1} \right| = 1,0 \,;\ P_{1-5}\left(\hat{\pi}^v_1 \right) = \frac{\left| \Delta^v_{1-5;\,1} \right|}{\left| \nabla_{1-5;\,1} \right|} = \begin{cases} \dfrac{0,2}{1,0} = 0,2 \left(v = 1, 6, 7 \right); \\ \dfrac{0,1}{1,0} = 0,1 \left(v = \overline{2,5} \right). \end{cases}$$

Определим вероятности $P_{kj}\left(S_i\right), i=\overline{1,5}$, ТС, в одном из которых может находиться анализируемый объект при выполнении проверки $\hat{\pi}_1$.

Например, ТС S_1 входит в состав ИС $R^1_{1-5;1}$, $R^2_{1-5;1}$ и $R^3_{1-5;1}$. Считая, что вероятности ТС $S_i\ \left(i=1,2,5\right)$, входящих в состав ИС $\left(R^2_{1-5;1}\right)^{(2)}$ и $\left(R^3_{1-5;1}\right)^{(3)}$, одинаковы, определим, используя формулу (8):

$$P_{1-5;1}\left(S_1\right)=P_{1-5}\left(\hat{\pi}^1_1\right)+\frac{1}{2}P_{1-5}\left(\hat{\pi}^2_1\right)+\frac{1}{3}P_{1-5}\left(\hat{\pi}^3_1\right)=1\cdot 0,2+\frac{1}{2}\cdot 0,1+\frac{1}{3}\cdot 0,1=\frac{17}{60}.$$

Аналогичным образом вычислим:

$$P_{1-5;1}\left(S_2\right)=\frac{11}{60};\ P_{1-5;1}\left(S_3\right)=0,15;\ P_{1-5;1}\left(S_4\right)=0,3;\ P_{1-5;1}\left(S_5\right)=\frac{1}{12}.$$

Рассмотрим конечные исходы $R^1_{1-5;1}=R_1=\left\{S_1\right\}$ и $R^7_{1-5;1}=R_4=\left\{S_4\right\}$ проверки $\hat{\pi}_1$, выполненной в начальном ИС $R_{1-5}=\left\{S_1,\ldots,S_5\right\}$. Для них, в соответствии с формулами (7), (9) и (10):

$$P^1_{1-5;1}=1;\quad V^1_{1-5;1}\left(S_1\right)=\frac{P^1_{1-5;1}-P_{1-5;1}\left(S_1\right)}{1-P_{1-5;1}\left(S_1\right)}=1;\quad V^1_{1-5;1}=P^1_{1-5;1}\cdot V^1_{1-5;1}\left(S_1\right)=1;$$

$$P^4_{1-5;1}=1;\quad V^7_{1-5;1}\left(S_4\right)=\frac{P^4_{1-5;1}-P_{1-5;1}\left(S_4\right)}{1-P_{1-5;1}\left(S_4\right)}=1;\quad V^7_{1-5;1}=P^4_{1-5;1}\cdot V^7_{1-5;1}\left(S_4\right)=1.$$

ИС $R^{\nu}_{1-5;1}\ \left(\nu=2,4,5,6\right)$ состоят из двух элементов.

Рассмотрим сначала ИС $R^2_{1-5;1}=R_{1,2}=\left\{S_1,S_2\right\}$, для которого, в соответствии с формулой (7), $P^1_{1-5;1}=P^2_{1-5;1}=0,5$.

Используя формулу (9), вычислим:

$$V^2_{1-5;1}\left(S_1\right)=\frac{P^1_{1-5;1}-P_{1-5;1}\left(S_1\right)}{1-P_{1-5;1}\left(S_1\right)}=\frac{13}{43};\ V^2_{1-5;1}\left(S_2\right)=\frac{P^2_{1-5;1}-P_{1-5;1}\left(S_2\right)}{1-P_{1-5;1}\left(S_2\right)}=\frac{19}{49}.$$

По формуле (10) определим:

$$V^2_{1-5;1}=P^1_{1-5;1}\cdot V^2_{1-5;1}\left(S_1\right)+P^2_{1-5;1}\cdot V^2_{1-5;1}\left(S_2\right)=0,5\cdot\frac{13}{43}+0,5\cdot\frac{19}{49}=0,3451.$$

Выполним аналогичные вычисления для ИС $R^{\nu}_{1-5;1}\ \left(\nu=4,5,6\right)$ и получим: $V^4_{1-5;1}=0,4211$; $V^5_{1-5;1}=0,5958$; $V^6_{1-5;1}=0,3487$.

Рассмотрим теперь ИС $R^3_{1-5;\,1} = \{S_1, S_2, S_5\} = R_{1,2,5}$, для которого, в соответствии с формулой (7), $P^1_{1-5;1} = P^2_{1-5;1} = P^5_{1-5;1} = \frac{1}{3}$.

По формуле (9) вычислим: $V^3_{1-5;1}(S_1) = \dfrac{P^1_{1-5;1} - P_{1-5;1}(S_1)}{1 - P_{1-5;1}(S_1)} = \dfrac{3}{43}$;

$$V^3_{1-5;1}(S_2) = \frac{P^2_{1-5;1} - P_{1-5;1}(S_2)}{1 - P_{1-5;1}(S_2)} = \frac{9}{49};\ V^3_{1-5;1}(S_5) = \frac{P^5_{1-5;1} - P_{1-5;1}(S_5)}{1 - P_{1-5;1}(S_5)} = \frac{3}{11}.$$

Используя формулу (10), определим:

$$V^3_{1-5;1} = P^1_{1-5;1} \cdot V^3_{1-5;1}(S_1) + P^2_{1-5;1} \cdot V^3_{1-5;1}(S_2) + P^5_{1-5;1} \cdot V^3_{1-5;1}(S_5) = 0{,}1754.$$

Ценность проверки $\hat{\pi}_1$, выполненной в начальном ИС $R_{1-5} = \{S_1, ..., S_5\}$, вычислим по формуле (11):

$$V_{1-5}(\hat{\pi}_1) = \sum_{\nu=1}^{7} P_{1-5}(\hat{\pi}_1^{\nu}) \cdot V^{\nu}_{1-5;1} = 0{,}2 \cdot 1 + 0{,}1 \cdot 0{,}3451 + 0{,}1 \cdot 0{,}1754 +$$
$$+ 0{,}1 \cdot 0{,}4211 + 0{,}1 \cdot 0{,}5958 + 0{,}2 \cdot 0{,}3487 + 0{,}2 \cdot 1 = 0{,}6235.$$

Информативность этой проверки определим по формуле (12):

$$I_{1-5}(\hat{\pi}_1) = \sum_{\nu=1}^{7} P_{1-5}(\hat{\pi}_1^{\nu}) \left[-\log_2 P_{1-5}(\hat{\pi}_1^{\nu})\right] = 2{,}7219.$$

Теперь вычислим эффективность проверки $\hat{\pi}_1$, выполненной в начальном ИС $R_{1-5} = \{S_1, ..., S_5\}$, используя формулу (6):

$$E_{1-5}(\hat{\pi}_1) = \frac{V_{1-5}(\hat{\pi}_1)}{I_{1-5}(\hat{\pi}_1)} = \frac{0{,}6235}{2{,}7219} = 0{,}2219.$$

Выполним аналогичные вычисления для проверок $\hat{\pi}_j \left(j = \overline{2,5}\right)$ и определим:

$$V_{1-5}(\hat{\pi}_2) = 0{,}6431;\ I_{1-5}(\hat{\pi}_2) = 2{,}7219;\ E_{1-5}(\hat{\pi}_2) = 0{,}2363;$$
$$V_{1-5}(\hat{\pi}_3) = 0{,}5792;\ I_{1-5}(\hat{\pi}_3) = 2{,}5219;\ E_{1-5}(\hat{\pi}_3) = 0{,}2297;$$
$$V_{1-5}(\hat{\pi}_4) = 0{,}7051;\ I_{1-5}(\hat{\pi}_4) = 2{,}4464;\ E_{1-5}(\hat{\pi}_4) = 0{,}2882;$$
$$V_{1-5}(\hat{\pi}_5) = 0{,}6655;\ I_{1-5}(\hat{\pi}_5) = 2{,}4464;\ E_{1-5}(\hat{\pi}_5) = 0{,}272.$$

Очевидно, что по условию (13) наиболее эффективным для проверки в начальном ИС $R_{1-5} = \{S_1, ..., S_5\}$ является признак π_4.

Аналогичным образом определим наиболее эффективные признаки для каждого из неконечных исходов проверки $\hat{\pi}_4$, выполненной в начальном ИС $R_{1-5} = \{S_1, ..., S_5\}$.

Выбрав для всех возможных ИС наиболее эффективные для проверки признаки, построим ГПА, представленную на рисунке.

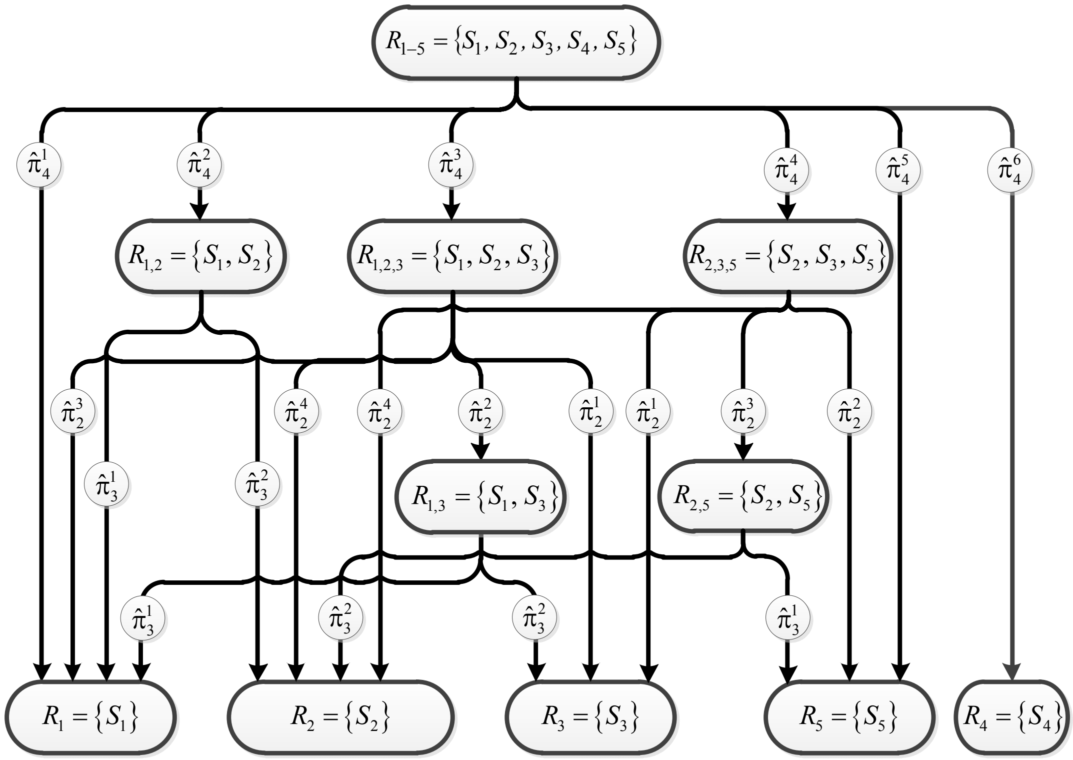

Рис. **Гибкая программа анализа технического состояния объекта**

Упорядоченные по очередности проверки подмножества $\Pi_r \left(r = \overline{1,15} \right)$, каждое из которых обеспечивает распознавание i ТС объекта с максимальной эффективностью, приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Наборы признаков, необходимых для распознавания технического состояния объекта**

S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Π_r	$\Pi_1=\{\pi_4\}$	$\Pi_5=\{\pi_4,\pi_3\}$	$\Pi_9=\{\pi_4,\pi_2,\pi_3\}$	$\Pi_{15}=\{\pi_4\}$	$\Pi_{12}=\{\pi_4,\pi_2,\pi_3\}$
	$\Pi_2=\{\pi_4,\pi_2\}$	$\Pi_6=\{\pi_4,\pi_2\}$	$\Pi_{10}=\{\pi_4,\pi_2\}$	–	$\Pi_{13}=\{\pi_4,\pi_2\}$
	$\Pi_3=\{\pi_4,\pi_3\}$	$\Pi_7=\{\pi_4,\pi_2,\pi_3\}$	$\Pi_{11}=\{\pi_4,\pi_2\}$	–	$\Pi_{14}=\{\pi_4\}$
	$\Pi_4=\{\pi_4,\pi_2,\pi_3\}$	$\Pi_8=\{\pi_4,\pi_2\}$	–	–	–

Разработанный алгоритм позволяет распознавать все заданные технические состояния объекта, используя при этом наиболее эффективные в смысле выбранного критерия диагностические признаки. Алгоритм может быть использован в составе программно-математического обеспечения автоматизированных комплексов анализа технического состояния сложных объектов как для решения задач контроля правильности их функционирования, так и при поиске дефектов в них с заданной глубиной.

Литература

1. Корогодин В.И., Корогодина В.Л. Информация как основа жизни. Дубна: Изд. центр «Феникс», 2000. 208 с.

2. Шеннон К. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд. ин. лит., 1963. С. 243–496.

3. Харкевич А.А. О ценности информации. Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз, 1960. Вып. 4. С. 53–72.

4. Шанкин Г.П. Ценность информации. Вопросы теории и приложений. М.: Филоматис, 2004. 128 с.

5. Дмитриев А.К., Копкин Е.В. Оптимизация сетевых структур диагностирования технических объектов на основе принципа максимума Понтрягина // Автоматика и вычислительная техника. 2004. № 5. С. 3–18.

References

1. Korogodin V.I., Korogodina V.L. Informaciya kak osnova zhizni. Dubna: Izd. centr «Feniks», 2000. 208 s.

2. Shennon K. Matematicheskaya teoriya svyazi // Raboty po teorii informacii i kibernetike. M.: Izd. in. lit., 1963. S. 243–496.

3. Harkevich A.A. O cennosti informacii. Problemy kibernetiki. M.: Fizmatgiz, 1960. Vyp. 4. S. 53–72.

4. SHankin G.P. Cennost' informacii. Voprosy teorii i prilozhenij. M.: Filomatis, 2004. 128 s.

5. Dmitriev A.K., Kopkin E.V. Optimizaciya setevyh struktur diagnostirovaniya tekhnicheskih ob"ektov na osnove principa maksimuma Pontryagina // Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika. 2004. № 5. S. 3–18.