Литвиненко А.Е., д. т.н. (НАУ, Украина)

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКАЗОВ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

Представлены логико-лингвистические модели определения множественных отказов в сложных системах. Описана процедура формирования системы алгебраических неравенств, к решению которой сводится задача диагностирования на основе приведенных моделей. Изложен алгоритм решения задачи диагностирования, реализующий стратегию направленного перебора вариантов.

Введение

Повышение сложности технических систем, обусловленное объективными тенденциями развития науки, техники и технологий, приводит к возрастанию доли множественных отказов на общем фоне факторов неработоспособности реальных объектов. Такие отказы могут происходить одновременно в различных местах (подсистемах) объекта контроля, иметь неоднородный характер и вызывать эффект «наложения» последствий [1]-[3].

Локализация множественных отказов требует применения нетрадиционных методов диагностирования, подобных тем, которые используются в экспертных системах [4]. Такие методы предусматривают наличие, по крайней мере, двух компонентов: логико-лингвистических моделей, отражающих причинно-следственные связи между системными объектами (входными воздействиями, выходными сигналами, характеристиками состояния и т.п.), а также алгоритмов логического вывода искомого результата на основе анализа этих моделей.

Известно, что существующие алгоритмы логического вывода обладают рядом существенных недостатков, основным из которых является слабая целенаправленность действия, обусловленная наличием эвристических элементов. Вследствие этого в процессе анализа логико-лингвистической модели формируется большой объем промежуточной информации, которая в дальнейшем не используется, но резко увеличивает затраты машинного времени.

Очевидно, что задача установления множественных отказов в сложном объекте диагностирования (ОД) носит комбинаторный характер. Это дает основание считать, что для ее решения могут быть применены методы комбинаторного анализа, свободные от недостатков эвристических алгоритмов. Это, в свою очередь, требует построения алгебраических форм, адекватных логико-лингвистическим моделям диагностирования.

Целью данной статьи является изложение одного из подходов к построению экспертных моделей диагностирования сложных объектов, преобразованию их к алгебраическим формам, позволяющим использовать для определения множественных отказов эффективные алгоритмы направленного перебора вариантов.

Постановка задачи

Предположим, объектом диагностирования является сложная техническая система, состоящая из m взаимодействующих подсистем. В каждой i-й подсистеме могут происходить отказы n_i видов, $i=\overline{1,m}$.

Состояние ОД в некоторый момент времени определяется вектором значений его характеристик $z^*=\left(z_p^*,\ p=\overline{1,u}\right)$.

Пусть e_p – эталонный уровень p-й характеристики состояния ОД; ε_p – допустимое отклонение, а δ_p – фактическое отклонение текущего значения этой характеристики от эталонного: $\delta_p=\left|z_p^*-e_p\right|,\ p=\overline{1,u}$.

Если для всех характеристик состояния ОД выполняется условие $\delta_p \le \varepsilon_p$, $p=\overline{1,u}$, можно утверждать, что ОД находится в нормальном (исправном, работоспособном) состоянии, в противном случае – в аномальном (неисправном, неработоспособном).

Переход ОД в аномальное состояние требует решения задачи диагностирования, формулируемой следующим образом: исходя из текущих значений характеристик состояния ОД, определить подсистемы, в которых произошли отказы, и виды этих отказов.

Модели

Экспертные модели диагностирования сложной технической системы, в которой возможны множественные отказы, могут строиться по двум схемам:

<комбинация элементарных отказов> → <изменение значения характеристики состояния системы> или

<элементарный отказ> → <изменение значений набора характеристик состояния системы>.

И в том, и в другом случае предполагается, что изменение значения каждой характеристики оценивается по отношению к заранее известному эталонному уровню. Допускается, что в случае невозможности количественного измерения той или иной характеристики состояния ОД она может быть задана на качественном уровне.

Экспертная модель диагностирования сложного объекта, построенная по первой схеме, имеет следующую структуру:

$$\bigvee_{r\in R_{pq}} \bigwedge_{i\in I_r} \bigwedge_{j\in J_{ri}} X_{ij} \rightarrow D(z_p, h_{pq}),\ p=\overline{1,u},\ q\in Q_p, \qquad (1)$$

где X_{ij} – логическое высказывание, описывающее элементарный отказ j-го вида в i-й подсистеме ОД;

$D(z_p, h_{pq})$ – предикат, отражающий изменение значения характеристики z_p состояния ОД на величину h_{pq} по отношению к эталонному уровню в результате той или иной комбинации элементарных отказов;

R_{pq} – множество комбинаций элементарных отказов, приводящих к изменению значения p-й характеристики состояния ОД на величину h_{pq};

I_r – множество подсистем ОД, отказы в которых составляют r-ю комбинацию;

J_{ri} – множество видов отказов в i-й подсистеме ОД, входящих в состав r-й комбинации;

u – количество контролируемых характеристик состояния ОД;

Q_p – множество возможных уровней изменения значения p-й характеристики состояния ОД в результате той или иной комбинации отказов.

Экспертная модель диагностирования сложного объекта, построенная по второй схеме, имеет следующий вид:

$$X_{ij} \rightarrow \bigwedge_{p\in P_{ij}} D(z_p, h_{pij});\quad i=\overline{1,m};\quad j=\overline{1,n_i}, \qquad (2)$$

где $D(z_p, h_{pij})$ – предикат, отображающий изменение значения характеристики z_p состояния ОД на величину h_{pij} по отношению к эталонному уровню в результате возникновения отказа j-го вида в i-й подсистеме;

P_{ij} – множество номеров характеристик состояния ОД, изменяющих свои значения под влиянием отказа j-го вида в i-й подсистеме.

Совокупность выражений (1) и/или (2) образует базу знаний экспертной системы диагностирования сложного объекта.

Для решения задачи диагностирования на основе экспертных моделей (1) и (2) может быть использован любой дедуктивный алгоритм логического вывода [5]. Наиболее эффективным из них считается алгоритм, построенный на принципе резолюций Дж. Робинсона [6]. Однако даже он обладает недостаточной целенаправленностью действия, зачастую приводящей к недопустимым задержкам в установлении возникающих в ОД неисправностей.

Стремление поставить процесс локализации множественных отказов на строгую математическую основу обусловило разработку нового подхода к диагностированию сложных технических систем. Он позволяет трансформировать экспертные логико-лингвистические модели (1) и (2) в системы алгебраических уравнений или неравенств, для решения которых созданы достаточно эффективные алгоритмы.

Процедура преобразования модели (1) в систему алгебраических уравнений и алгоритм ее решения описаны в работе [7], поэтому в данной статье рассматриваться не будут. Однако применение изложенной там методики к экспертной модели (2) позволяет сопоставить ей систему алгебраических неравенств:

$$\begin{cases} \sum\limits_{i\in I_p} \sum\limits_{j\in J_{pi}} x_{ij}(h_{pij} - \xi_{pij}) \le \delta_p \\ \sum\limits_{i\in I_p} \sum\limits_{j\in J_{pi}} x_{ij}(h_{pij} - \xi_{pij}) \ge \delta_p \end{cases}; p = \overline{1,u}, \tag{3}$$

где x_{ij} – булевая переменная, поставленная в соответствие логическому высказыванию X_{ij}, описывающему отказ j-го вида в i-й подсистеме ОД; $x_{ij} \in \{0,1\}$, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n_i}$;

I_p – множество подсистем ОД, отказы в которых приводят к изменению значения характеристики z_p:

$$I_p = \{i : 1 \le i \le m; J_{pi} \ne \varnothing\};$$

J_{pi} – множество видов отказов в i-й подсистеме ОД, приводящих к изменению значения характеристики z_p;

ξ_{pij} – допустимое рассогласование между фактическим и предусмотренным экспертной моделью (2) отклонением значения характеристики z_p, вызванным возникновением отказа j-го вида в i-й подсистеме ОД.

Задача определения множественных отказов в сложном ОД на основе экспертной модели (2) сводится к отысканию вектора значений переменных $(x_{ij}; i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n_i})$, удовлетворяющих системе неравенств (3) и условию бивалентности. Смысл искомых переменных интерпретируется следующим образом: если в результате решения системы (3) переменная $x_{i^*j^*}$ принимает значение 1, это означает, что в i^*-й подсистеме ОД произошел отказ j^*-го вида; при $x_{i^*j^*} = 0$ данное утверждение неверно.

Бивалентность искомых переменных, входящих в систему неравенств (3), дает возможность использовать для ее решения метод направленного перебора вариантов [8], адаптированный под структуру приведенных математических выражений.

Алгоритмы

Применительно к рассматриваемой задаче метод направленного перебора предусматривает последовательное дробление исходного множества G вариантов решения системы неравенств (3), производимое до тех пор, пока не будет установлен вектор значений искомых переменных, удовлетворяющий этой системе, или факт ее несовместности. Разбиение множества G и последующих его подмножеств осуществляется путем фиксации значений искомых переменных. Для дальнейшего разбиения на каждом этапе решения задачи выбирается то подмножество вариантов, которому соответствует минимальное количество переменных, получивших фиксированные значения. Выделяемые подмножества вариантов подвергаются формальному анализу с целью максимально сузить область дальнейшего поиска, сократить объем обрабатываемой информации и тем самым ускорить процесс получения искомого результата.

С целью более компактного представления системы (3) введем следующие обозначения:

$$a^1_{pij} = h_{pij} - \xi_{pij}\,;\; a^2_{pij} = -h_{pij} - \xi_{pij}\,;\; \delta^1_p = \delta_p\,;\; \delta^2_p = -\delta_p\,.$$

Тогда систему (3) можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i\in I_p}\sum_{j\in J_{pi}} a^{\nu}_{pij} x_{ij} \le \delta^{\nu}_p\,;\; p=\overline{1,u}\,;\; \nu = 1,2\,. \qquad (4)$$

Очевидно, полное множество G вариантов решения системы (4) состоит из 2^{σ} векторов значений переменных x_{ij}, $i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,n_i}$, где $\sigma = \sum_{i=1}^{m} n_i$.

Предположим, к началу некоторого этапа решения задачи в полном множестве вариантов выделены λ непересекающихся подмножеств, содержащих допустимые векторы значений искомых переменных, $k=\overline{1,\lambda}$.

Абстрагируясь от физического смысла рассматриваемой задачи и учитывая, что независимые переменные и неравенства системы (4) имеют двойную индексацию, введем следующие обозначения:

I^0_k и I^1_k – множества первых индексов искомых переменных, получивших в векторах подмножества G_k значения 0 и 1 соответственно:

$$I^0_k = \left\{ i : 1 \le i \le m, \exists j \left[(1 \le j \le n_i) \,\&\, (x_{ij} = 0) \right] \right\},$$

$$I^1_k = \left\{ i : 1 \le i \le m, \exists j \left[(1 \le j \le n_i) \,\&\, (x_{ij} = 1) \right] \right\};$$

I_k – множество первых индексов искомых переменных, значения которых в векторах подмножества G_k не зафиксированы:

$$I_k = \left\{ i : 1 \le i \le m, J_{ik} \ne \varnothing \right\};$$

J^0_{ik} и J^1_{ik} – множества вторых индексов переменных x_{ij}, $i \in I^0_k$ и x_{ij}, $i \in I^1_k$, соответственно, получивших в векторах подмножества G_k значения 0 и 1:

$$J^0_{ik} = \left\{ i : 1 \le j \le n, x_{ij} = 0 \right\}, \quad i \in I^0_k;$$

$$J^1_{ik} = \left\{ i : 1 \le j \le n, x_{ij} = 1 \right\}, \quad i \in I^1_k;$$

J_{ik} – множество вторых индексов переменных x_{ij}, $i \in I_k$, значения которых в векторах подмножества G_k не зафиксированы:

$$J_{ik} = \left\{ 1, \dots, n_i \right\} \setminus \left(J^0_{ik} \cup J^1_{ik} \right), \quad i \in I_k.$$

Набор значений переменных x_{ij}, $i \in I^0_k \cup I^1_k$, $j \in J^0_{ik} \cup J^1_{ik}$, такой что

$$\left(\forall i\in I_k^0\right)\left(\forall j\in J_{ik}^0\right)\left(x_{ij}=0\right)\&\left(\forall i\in I_k^1\right)\left(\forall j\in J_{ik}^1\right)\left(x_{ij}=1\right),$$

будем называть частичным планом k-го подмножества вариантов, а любой набор значений переменных x_{ij}, $i\in I_k$ $j\in J_{ik}$, удовлетворяющих условию бивалентности $x_{ij}\in\{0,1\}$, – дополняющим планом данного подмножества G_k.

Неравенство системы (4), которому не удовлетворяет хотя бы один из дополняющих планов подмножества G_k, называется активным по отношению к планам данного подмножества вариантов. Пусть P_k и N_{pk} – множества номеров таких неравенств: $P_k\subseteq\{1,...,u\}$; $N_{pk}\subseteq\{1,2\}$.

Подстановка частичного плана каждого k-го $(1\le k\le\lambda)$ подмножества вариантов в исходную систему неравенств (4) преобразует ее к частной форме, соответствующей данному подмножеству. Для представления такой частной формы на множествах I_p и J_{pi} выделяются следующие подмножества:

$$I_{pk}=I_p\bigcap I_k;\ J_{pik}=J_{pi}\bigcap J_{ik};\ I_{pk}^1=I_p\bigcap I_k^1;\ J_{pik}^1=J_{pi}\bigcap J_{ik}^1.$$

С учетом введенных обозначений система неравенств (4), приведенная в соответствие подмножеству вариантов G_k, приобретет следующий вид:

$$\sum_{i\in I_{pk}}\sum_{j\in J_{pik}}a_{pij}^{\nu}x_{ij}\le\delta_{pk}^{\nu};\ p\in P_k;\ \nu\in N_{pk},\tag{5}$$

где

$$\delta_{pk}^{\nu}=\delta_p^{\nu}-\sum_{i\in I_{pk}^1}\sum_{j\in J_{pik}^1}a_{pij}^{\nu}.$$

Алгоритм решения системы неравенств (4), реализующий стратегию направленного перебора вариантов, предусматривает выполнение на каждом этапе вычислительного процесса следующей последовательности действий:

- – выбор подмножества вариантов, подлежащего дальнейшему разбиению;
- – выбор переменной, значения которой подлежат фиксации;
- – разбиение подмножества вариантов на два непересекающихся подмножества;
- – анализ вновь полученных подмножеств вариантов;
- – проверка условий окончания вычислительного процесса.

1. Выбор подмножества вариантов, подлежащего разбиению.

Поскольку задачи диагностирования по своему физическому смыслу не являются оптимизационными, в качестве критерия выбора подмножества вариантов для дальнейшего разбиения целесообразно использовать количество переменных, которые в подмножествах G_k, $k=\overline{1,\lambda}$ имеют фиксированные значения. Это означает, что для дальнейшего разбиения выбирается подмножество вариантов G_{k^*}, $1\le k^*\le\lambda$, которому соответствует частичный план максимальной мощности:

$$\sigma_{k^*}=\max\left\{\sigma_k,\ k=\overline{1,\lambda}\right\},\ \text{где}\ \sigma_k=\sum_{\vartheta=0}^{1}\sum_{i\in I_k^{\vartheta}}\left|J_{ik}^{\vartheta}\right|.$$

Такой критерий отвечает стремлению достичь искомого результата вычислений за минимальное количество шагов алгоритма.

2. Выбор переменной, значения которой подлежат фиксации.

Исходя из соображений, приведенных в предыдущем пункте, для данной операции целесообразно выбрать переменную, фиксация значений которой приводит или может в дальнейшем привести к существенному упрощению системы (5), соответствующей подмножеству вариантов G_{k*}. Таким свойством может обладать переменная, входящая в неравенства системы (5) с максимальным по модулю коэффициентом.

Следовательно, для присваивания значений выбирается переменная x_{i*j*}, такая что

$$\left|a^{\nu}_{pi*j*}\right| = \max\{\left|a^{\nu}_{pij}\right|;\ p\in P_{k*};\ i\in I_{pk*};\ j\in J_{pik*};\ \nu\in N_{pk}\}.$$

3. Разбиение подмножества вариантов G_{k*}.

Путем фиксации значений переменной x_{i*j*} подмножество G_{k*} разбивается на два непересекающихся подмножества вариантов G^0_{k*} и G^1_{k*}. Во всех планах первого из них $x_{i*j*}=0$, в планах второго $x_{i*j*}=1$. Эти значения поочередно подставляются в неравенства системы (5), вследствие чего формируются две новые системы неравенств, соответствующие двум новым подмножествам вариантов G^0_{k*} и G^1_{k*}.

4. Анализ подмножеств вариантов G^0_{k*} и G^1_{k*}.

Для формализации процедуры анализа введем следующие обозначения:

$$I^{\nu 2}_{pk}=\{i\in I_{pk}:(\exists j\in J_{pik})(a^{\nu}_{pij}<0)\};\ \ J^{\nu 2}_{pik}=\{j\in J_{pik}:a^{\nu}_{pij}<0\};\ i\in I^{\nu 2}_{pk};$$

$$I^{\nu 3}_{pk}=\{i\in I_{pk}:(\exists j\in J_{pik})(a^{\nu}_{pij}>0)\};\ \ J^{\nu 3}_{pik}=\{j\in J_{pik}:a^{\nu}_{pij}>0\};\ i\in I^{\nu 3}_{pk};$$

$$I^{\nu 2}_{pk}(i')=\{i'\}\bigcup\{i\in I^{\nu 2}_{pk}:(\exists j\in J^{\nu 2}_{pik})(a^{\nu}_{pij}\le a^{\nu}_{pi'j})\};$$

$$J^{\nu 2}_{pi'k}(j')=\{j'\}\bigcup\{j\in J^{\nu 2}_{pi'k}:a^{\nu}_{pi'j}\le a^{\nu}_{pi'j'}\};$$

$$I^{\nu 3}_{pk}(i'')=\{i''\}\bigcup\{i\in I^{\nu 3}_{pk}:(\exists j\in J^{\nu 3}_{pik})(a^{\nu}_{pij}\ge a^{\nu}_{pi''j})\};$$

$$J^{\nu 3}_{pi''k}(j'')=\{j''\}\bigcup\{j\in J^{\nu 3}_{pi'k}:a^{\nu}_{pi''j}\ge a^{\nu}_{pi''j''}\};$$

$$s^{\nu\mu}_{pk}=\begin{cases}\sum\limits_{i\in I^{\nu\mu}_{pk}}\sum\limits_{j\in J^{\nu\mu}_{pik}}a^{\nu}_{pij},\ \textit{если}\ \ I^{\nu\mu}_{pk}\ne\varnothing\\ 0-\textit{в противном случае}\end{cases};\quad \nu\in N_{pk};\ \mu\in\{2,3\}.$$

В основе формального анализа любого подмножества вариантов G_k, $1\le k\le\lambda$ лежат четыре следующие утверждения, очевидность которых освобождает от необходимости их доказательства.

Утверждение 1. Подмножество G_k не содержит допустимых планов, если для некоторой пары индексов, $p\in P_k$ и $\nu\in N_{pk}$ выполняется условие

$$s^{\nu 2}_{pk}>\delta^{\nu}_{pk}.$$

Утверждение 2. Неравенство системы (5), идентифицируемое парой индексов $p\in P_k$ и $\nu\in N_{pk}$, не является активным по отношению к планам подмножества G_k, если для него выполняется условие

$$s^{\nu 3}_{pk}\le\delta^{\nu}_{pk}.$$

Утверждение 3. Если для неравенства системы (5), идентифицируемого парой индексов $p \in P_k$ и $\nu \in N_{pk}$, справедливо $I_{pk}^{\nu 2} \neq \varnothing$ и для некоторого $i' \in I_{pk}^{\nu 2}$ существует такой $j' \in J_{i'pk}^{\nu 2}$, что выполняется условие

$$s_{pk}^{\nu 2} \le \delta_{pk}^{\nu} < s_{pk}^{\nu 2} - a_{pi'j'}^{\nu},$$

то из дополняющих планов подмножества вариантов G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых

$$[\forall i \in I_{pk}^{\nu 2}(i')][\forall j \in J_{ipk}^{\nu 2}(j')](x_{ij} = 1).$$

Утверждение 4. Если для неравенства системы (5), идентифицируемого парой индексов $p \in P_k$ и $\nu \in N_{pk}$, справедливо $I_{pk}^{\nu 3} \neq \varnothing$ и для некоторого $i'' \in I_{pk}^{\nu 3}$ существует такой $j'' \in J_{i''pk}^{\nu 3}$, что выполняется условие

$$s_{pk}^{\nu 2} \le \delta_{pk}^{\nu} < s_{pk}^{\nu 2} + a_{pi''j''}^{\nu},$$

то из дополняющих планов подмножества вариантов G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых

$$[\forall i \in I_{pk}^{\nu 3}(i'')][\forall j \in J_{ipk}^{\nu 3}(j'')](x_{ij} = 0).$$

Процедура анализа подмножества вариантов G_k, $1 \le k \le \lambda$, заключается в последовательной проверке выполнения условий каждого из сформулированных утверждений для всех неравенств системы (5). В зависимости от результатов этой проверки в цикле анализа осуществляется та или иная совокупность действий.

1) Если для некоторого неравенства системы (5) выполняется условие утверждения 1, то анализируемое подмножество вариантов G_k исключается из дальнейшего рассмотрения как не содержащее допустимых планов, а процедура анализа на этом завершается. В противном случае осуществляется переход к следующему пункту данной процедуры.

2) Если для некоторого неравенства системы (5), идентифицируемого парой индексов $p' \in P_k$ и $\nu' \in N_{pk}$, выполняется условие утверждения 2, то оно исключается из системы (4), поскольку не способно влиять на выбор дополняющего плана подмножества вариантов G_k. После этого корректируется состав множеств P_k и Q_{pk}, элементы которых идентифицируют неравенства, активные по отношению к планам данного подмножества. Обновленный состав указанных множеств определяется согласно формулам

$$N'_{pk} = N_{pk} \setminus \{\nu'\}, \quad P'_k = \begin{cases} P_k \setminus \{p'\}, \text{ если } N'_{pk} = \varnothing \\ P_k \text{ в противном случае} \end{cases}.$$

Далее, если рассмотренное неравенство не является последним в системе (5), условие утверждения 3 проверяется для следующего неравенства и т.д.

Если оказывается, что $P'_k = \varnothing$, это означает, что системе неравенств (5) удовлетворяют все дополняющие планы подмножества вариантов G_k. На этом вычислительный процесс заканчивается, поскольку решение системы неравенств (4) найдено. Таким решением является вектор значений искомых переменных, состоящий из частичного и любого дополняющего планов подмножества G_k.

Если же после проверки выполнения условия утверждения 2 для всех неравенств системы (5) оказывается, что $P'_k \neq \varnothing$, то осуществляется переход к следующему пункту процедуры анализа подмножества вариантов G_k.

3) Если для некоторого неравенства системы (5), идентифицируемого парой индексов $p \in P'_k$ и $\nu \in N'_{pk}$, выполняется условие утверждения 3, то переменным x_{ij}, $i \in I^{\nu 2}_{pk}(i')$, $j \in J^{\nu 2}_{ipk}(j')$ присваиваются значения 1. Эти значения подставляются во все активные (по отношению к планам подмножества G_k) неравенства системы (5). После этого производится повторный цикл анализа k-го подмножества вариантов, начиная с первого пункта. Проверка выполнения условия утверждения 1 для данного неравенства в повторном цикле опускается.

В противном случае осуществляется переход к следующему пункту процедуры анализа подмножества G_k.

4) Если для некоторого неравенства системы (5), идентифицируемого парой индексов $p \in P'_k$ и $\nu \in N'_{pk}$, выполняется условие утверждения 4, то переменным x_{ij}, $i \in I^{\nu 3}_{pk}(i'')$, $j \in J^{\nu 3}_{ipk}(j'')$ присваиваются значения 0. Эти значение подставляется во все активные (по отношению к планам подмножества G_k) неравенства системы (5). После этого производится повторный цикл анализа k-го подмножества вариантов, начиная с первого пункта. Проверка выполнения условия утверждения 1 для данного неравенства в повторном цикле опускается.

В противном случае процедура анализа подмножества вариантов G_k завершается.

Описанная процедура поочередно выполняется в отношении новых подмножеств вариантов G^0_{k*} и G^1_{k*}. После этого (если искомое решение не найдено) все оставшиеся в поле рассмотрения подмножества вариантов заново перенумеровываются, начиная с единицы.

5. Проверка условий окончания вычислительного процесса.

Вычислительный процесс завершается после нахождения решения (множества решений) системы неравенств (4) или установления факта ее несовместности.

Формальным признаком нахождения решения системы (4) служит отсутствие неравенств, активных по отношению к планам некоторого подмножества вариантов $G_k, 1 \leq k \leq \lambda$.

Система неравенств (4) имеет единственное решение, если

$$(k = \lambda = 1) \& (P'_k = \varnothing) \& (I_k = \varnothing) \& (J_{ik} = \varnothing).$$

Если же, в частности, $(P'_k = \varnothing) \& (I_k = \varnothing)$, это означает, что одно лишь подмножество G_k содержит столько решений системы неравенств (4), сколько и дополняющих планов.

Формальным признаком несовместности системы неравенств (4) служит отсутствие подмножеств вариантов, оставшихся в поле рассмотрения после выполнения процедуры анализа на каком-либо этапе вычислительного процесса: $\lambda = 0$.

Если на текущем этапе условия окончания вычислительного процесса не выполняются, то осуществляется следующий этап реализации описанного алгоритма.

Вектор значений искомых переменных $x^* = \left(x^*_{ij}, i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n_i}\right)$, являющийся единственным решением системы неравенств (4), определяет подсистемы ОД, в которых произошли множественные отказы, и характер этих отказов.

Наличие множества решений системы неравенств (4) свидетельствует о недостаточной глубине детализации экспертной модели диагностирования (2), а отсутствие решений – о противоречивости и, следовательно, полной непригодности этой модели для практических целей.

Начинать решение задачи целесообразно с анализа полного множества вариантов G. В некоторых случаях это позволяет без процедуры разбиения определить решение системы неравенств (4), установить факт ее несовместности или, по крайней мере, существенно сузить область дальнейшего поиска решений.

Выводы

Определение множественных отказов в сложных объектах, для которых характерен эффект «наложения» последствий элементарных неисправностей, требует применения экспертных моделей диагностирования.

Известные дедуктивные алгоритмы логического вывода, ориентированные на использование подобных моделей, не являются эффективными из-за своей громоздкости и слабой направленности действия.

Комбинаторный характер задачи установления множественных отказов дает основание считать целесообразным применение для ее решения быстродействующих алгоритмов направленного поиска вариантов. Однако они требуют преобразования логико-лингвистических моделей диагностирования к адекватным алгебраическим формам.

В статье представлены логико-лингвистические модели определения множественных отказов в сложных системах, описана процедура формирования системы алгебраических неравенств, к решению которой сводится задача диагностирования на основе приведенных моделей, изложен алгоритм решения задачи диагностирования, реализующий стратегию направленного перебора вариантов.

Приведенный алгоритм обладает свойством полноты, обусловленным тем, что ни одно из выделяемых подмножеств вариантов не исключается из поля рассмотрения до установления факта несовместности соответствующей ему системы неравенств.

Алгоритм реализован в среде Delphi 3.0 с использованием языка Object Pascal.

Список литературы

1. *Курочкин Ю.А., Смирнов А.С., Степанов В.А.* Надежность и диагностирование цифровых устройств и систем. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1993. – 320 с.

2. *Мироновский Л.А.* Функциональное диагностирование динамических систем. – М., 1998. – 256 с.

3. *Рябинин И.А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

4. *Попов Э.В.* Экспертные системы: решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 288 с.

5. *Искусственный интеллект.* — Кн. 2. Модели и методы: Справочник // Под ред. Д.А.Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.

6. *Вагин В.Н.* Дедукция и обобщение в системах принятия решений. – М.: Наука, 1988. – 384 с.

7. *Литвиненко О.Є.* Математичний метод визначення множинних відмов в складних технічних системах. – Вісник НАУ, 2002. – №4. – с. 143-150.

8. *Литвиненко А.Е.* Определение класса истинности логических формул методом направленного перебора // Кибернетика и системный анализ, 2000. – № 5. – С. 23-31.