

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(Государственный технический университет)

факультет №3

кафедра «Информационные технологии»

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой 308
профессор, д. т. н.

Шаронов А. В.

« ____ » _____ 2006 г.

Лабораторная работа №3
«Построение программы поиска неисправностей методом
ветвей и границ»

по курсу «Технический контроль и диагностика систем ЛА»

количество часов: 8

Автор:

доц., к.т.н. Пискунов В. А.

Москва, 2006 г.

1. Цель работы.

Целью данной лабораторной работы является:

- ознакомление с ЭВМ.
- ознакомление с методом ветвей и границ для построения программы поиска неисправностей. Моделирование на ЭВМ процесса построения программы поиска методом ветвей и границ.
- оценка вычислительных затрат необходимых для построения программ локализации неисправностей.

2. Методика проведения лабораторной работы.

Занятие № 1: Ознакомление с описанием работы и написание программы для расчёта на ЭВМ.

Занятие № 2: Проведение расчётов на ЭВМ и обработка результатов расчета.

Занятие № 3: Сдача работы.

3. Теоретическая часть.

Контроль работоспособности и поиск неисправностей методом ветвей и границ.

При контроле работоспособности летательных аппаратов часто помимо двух альтернативной задачи определения работоспособности либо неработоспособности объекта контроля, необходимо решать и много альтернативную задачу локализации неисправностей. Конечно, целью такой задачи является отнесение объекта контроля в одной из заданных подобластей отказов состояний, которые соответствуют конкретным отказам элементов контролируемого объекта. Следует отметить, что автоматический контроль работоспособности и поиск неисправностей возможны лишь для устройств, обладающих следующими свойствами:

1. Они могут находиться, по крайней мере, в двух взаимоисключающих и различных состояний, работоспособном и не работоспособном, то есть в состоянии отказа.
2. Они могут быть разделены на отдельные функциональные элементы, каждый из которых может одновременно находится, лишь в одном из указанных различных состояний.

Функциональная модель строится непосредственно по структурной или принципиальной электрической схеме, контролируемого устройства. Как правило, она изображается графической схемой, на которой каждый функциональный элемент обозначен прямоугольником с некоторым количеством входящих стрелок (входных сигналов) и одной выходящей стрелкой (выходным сигналом).

Входы, которые не соединены ни с одним выходом, называются внешними. Эти входы означают внешние воздействия, которые подаются на объект контроля и обычно обозначаются I_j , где i – номер функционального элемента, j – номер его входа.

Выходы функционального элемента обозначаются буквой Z_j , где i – номер функционального элемента, j – номер его выхода. Если сигнал с выхода используется в качестве входного функционального элемента, то такой выход называют связанным или промежуточным. Выход, сигнал с которого не используется в качестве входного для другого функционального элемента, называют свободным. Кроме построения функциональной модели объекта контроля необходимо ещё определить множество возможных состояний его, то есть перечислить все возможные комбинации одновременно отказавших элементов, а так же определять перечень контролируемых параметров и указать значения допустимых входных сигналов, прикладываемых к каждому элементу.

Известно, что общее число возможных состояний объекта контроля при его разделении на N функциональных элементов и бинарном исходе для каждого составляет $2^N - 1$. Однако определить такое сравнительно большое число состояний обычно трудно даже для современных

автоматизированных систем контроля. Поэтому в инженерной практике предполагают, что в объекте контроля возможен отказ лишь одного функционального элемента, то есть ограничиваются учетом возможных отказов. При этом допущения резко сокращается число возможных состояний объекта контроля и становится равным $C_N^1 = N$, то есть числу первичных функциональных элементов модели объекта контроля. Определение N – различных состояний объекта контроля, а также учет влияния отказа одного функционального элемента на все остальные, осуществляется с помощью таблицы или матрицы неисправностей. Таблица неисправностей представляет собой квадратную матрицу, в которой число строк равно числу функциональных элементов модели, а число столбцов – числу выходных параметров. Она заполняется на основании логического анализа функциональной модели объекта контроля в предположении, что все выходные параметры функциональных элементов контролируются.

Правила построения таблицы следующие:

Предполагают, что объект контроля находится в S_i -ом состоянии, то есть отказал i -й функциональный элемент, чему соответствует недопустимое значение выходного значения выходного параметра Z_i .

На пересечении S_i -й строки Z_i -го столбца записываются символом "0". Кроме того, если при этом j -й функциональный элемент имеет такое недопустимое значение выходного параметра, то на пересечении S_i -й строки и Z_j -го столбца так же прописывается "0". В противном случае записывается символ "1".

Функциональная модель и таблица неисправностей задают связь между множеством возможных состояний S – объекта контроля, множеством контролируемых параметров Z и множеством результатов контроля этих параметров.

Наличие такой информации об объекте контроля позволяет разрабатывать программы поиска и локализации неисправностей в нем.

При разработке таких программ кроме таблицы неисправностей необходимо еще располагать информацией о вероятностях $P(S_i)$ различных состояний объекта контроля и о стоимости контроля выходных параметров $C(Z_i)$.

Вероятности состояний $P(S_i)$ объекта контроля на этапе проектирования рассчитывают методами теории надежности, которые учитывают данные об отказах, полученными в процессе эксплуатации аналогичных объектов. Стоимость контроля выходных параметров функциональных элементов отражает как различные затраты на выполнение контрольных операций, так и большое число других факторов. В наиболее общем виде она может иметь вид:

$$C(Z_i) = LT(Z_i) + \beta W(Z_i) + \gamma G(Z_i)$$

Где $T(Z_i)$ – временные затраты, $W(Z_i)$ – денежные затраты.

$G(Z_i)$ – весовые затраты на контроль, i – го параметра.

α, β, γ – коэффициенты веса или важности каждого вида затрат при контроле данного параметра, причем: $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Для уменьшения затрат на поиск неисправностей и для создания наиболее простых программ поиска используют различные оптимальные способы их построения.

При оптимизации программ поиска решают, как правило, две задачи. Первая заключается в том, чтобы выбрать наилучший набор контролируемых параметров в смысле экстремума целевой функции оптимизации. Вторая задача состоит в том, чтобы указать наилучшую последовательность контроля выбранных параметров в том же смысле.

В качестве целевых функции оптимизации используются число отдельных проверок в программе поиска и средние затраты на определение одного различного состояния объекта контроля.

Одним из возможных методов построения программ поиска неисправностей является метод Ветвей и Границ.

Данный метод применяется для разработки программ поиска неисправностей в объектах, функциональная модель которых представляет собой произвольную структуру из N первичных элементов с различной стоимостью контроля выходных параметров.

Этот математический метод позволяет определить последовательность поиска наилучшего решения среди множества возможных решений. Для этого область возможных решений

последовательно разбивается на все меньшие и меньшие подмножества, для каждого из которых вычисляется нижняя граница минимизируемой функции. Подмножества, у которых значения нижней границы превышает некоторую заданную величину, исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Процесс разбиения продолжается до тех пор, пока не будет найдено такое решение, при котором значение минимизируемой функции предпочтения, не превышает значения нижней границы для любого подмножества.

Исходной информацией для построения программы поиска служит функциональная модель объекта контроля, а также таблица неисправностей с вероятностями различных состояний $P(S_i)$ и стоимостями контроля C_i выходных параметров функциональных элементов.

В общем случае можно предположить, что для объекта контроля, разделенного на N функциональных элементов с произвольными связями между ними, достаточно контролировать $m \leq N$ параметров. Очевидно, что имеется некоторая последовательность контроля выделенных m параметров, будет обладать минимальной средней стоимостью при поиске неисправностей элементов.

Среднюю стоимость произвольной программы поиска можно определить так:

$$C = \sum_{i=1}^m C_i \sum_{j=1}^n P(S_{ij}) \text{ или } C = \sum_{i=1}^m P(S_i) \sum_{j=1}^n C_j$$

где C_i – стоимость контроля i – го параметра.

$\sum_{j=1}^n P(S_{ij})$ – сумма вероятностей состояний, которые рассматривались при контроле i – го параметра.

Поскольку о последовательности контроля m параметров ничего не известно, то следует предположить, что программа поиска может начинаться с контроля любого из m параметров. По функциональной модели поиска определить, что контроль i – го параметра разбивает все множества возможных состояний S – объекта контроля на два подмножества $S_0(Z_i)$ и $S_1(Z_i)$ которые соответствуют отрицательному и положительному результатам контроля параметра Z_i – соответственно. Так как последовательность контроля остальных параметров, входящих в подмножества $S_0(Z_i)$ и $S_1(Z_i)$ неизвестно, то, следовательно, нельзя определить значение средней стоимости программы поиска.

В соответствии с методом “ветвей и границ” искомые значения средних стоимостей заменяются их нижними границами $C_n(S_0)$ и $C_n(S_1)$ при контроле соответствующих параметров в подмножествах $S_0(Z_i)$ и $S_1(Z_i)$. Тогда нижняя граница средней стоимости всей программы поиска, которая начинается с контроля i – го параметра, будет определяться выражением:

$$C_n = C_i \sum_{j=1}^n P(S_{ij}) + C_n(S_0) + C_n(S_1)$$

Вычислим нижние границы стоимостей $C_n(S_0)$ и $C_n(S_1)$ как скалярное произведение упорядоченного по возрастанию набора бинарных вероятностей на упорядоченный по убыванию набор стоимостей для всех возможных пар контролируемых параметров между первыми и оставшимися для каждого подмножества. Допустим, что подмножества $S_0(Z_i)$ контролируется параметр Z_k , а для подмножества $S_1(Z_i)$ – параметр Z_r . Тогда средняя стоимость нижней границы программы поиска, начинающаяся с контроля i – го параметра будет равна:

$$C_n = C_i \sum_{j=1}^n P(S_{ij}) + C_k(Z_k, S_0) + C_r(Z_r, S_1)$$

Вторым, следовательно, выбирается такой параметр, при контроле которого получается минимальная средняя стоимость нижней границы из всех возможных программ поиска.

Аналогичным образом выбирают третий и т.д., параметры, пока выделяемые при контроле подмножества будут содержать не более двух состояний объекта контроля. Следовательно, программа поиска, построенная на основании выбора последовательности контролируемых параметров, дающих в среднем минимальную стоимость нижней границы, также будет обладать минимальной средней стоимостью поиска любого неисправного элемента объекта контроля.

При использовании метода ветвей и границ процесс выбора последовательности контролируемых параметров обычно изображают графически в виде дерева решений.

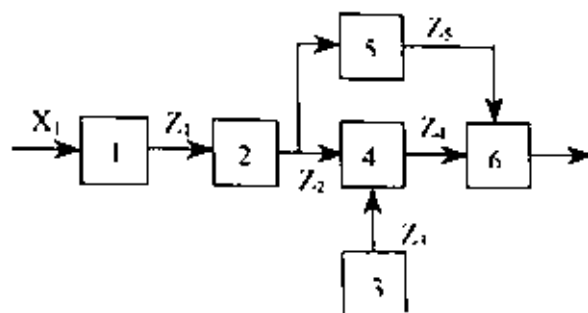
Каждая вершина этого дерева связывается с контролем некоторого параметра и нижней границей программы поиска. Последовательность контролируемых параметров записывается внутри, а значение стоимости нижней границы – около вершины.

Вершины одного и того же ряда соответствуют одному числу, причем в каждом ряду вершины располагаются в порядке убывания значения стоимости нижней границы, слева направо. Ветви, идущие от одной вершины, к другой, показывают исправление движения к тому допустимому решению, которое вытекает из предыдущего.

Ветви, идущие от одной вершины к другой, показывают исправление движения к тому допустимому решению, которое вытекает из предыдущего. В дереве решения есть вершины с ответвлениями и так называемые висячие вершины, из которых не исходит ни одной ветви. Такие вершины дают или окончательное решение, т.е. конкретную программу поиска, либо обязательно с наилучшей последовательностью контроля параметров, или решение, которое заведомо не приведет к оптимальному значению средней стоимости поиска.

Наиболее важной и существенной задачей, при использовании метода ветвей и границ является вычисление стоимости нижней границы на каждом шаге контроля.

Рассмотрим процесс вычисления нижней границы программы поиска в предположении, что стоимости контроля всех параметров одинаковы и равны, С. Для этого используем функциональную модель, изображенную на рис.1:



И матрицу состояний, таблица № 1.

| S | Z _i | | | | | P(S _i) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₄ | Z ₅ | |
| S ₁ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 |
| S ₂ | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,05 |
| S ₃ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0,24 |
| S ₄ | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0,15 |
| S ₅ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,06 |
| S ₆ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 |

Для вычисления значения стоимости нижней границы подмножества $S_0(Z_i)$ и $S_1(Z_i)$ необходимо выполнить следующие операции:

1. Расположить по возрастанию значений вероятности состояний объекта контроля, входящие в подмножества $S_0(Z_i)$ и $S_1(Z_i)$.

2. Найти вероятность P_1^* - равную сумме двух наименьших вероятностей построенной последовательности.

3. Последовательно повторить выполнение первого и второго пунктов, при этом каждый раз строя новую последовательность значений вероятностей.

4. Процесс заканчивается, когда остается одно значение вероятности.

Тогда значение стоимости нижней границы для подмножества $S_0(Z_1)$ при контроле параметра Z_1 будет равно:

$$C_n(S_0) = C \sum_{\lambda=1}^{n-1} P \lambda^*$$

Таким образом можно вычислить значение $C_n(S_1)$:

$$C_n(S_1) = C \sum_{v=1}^{N-1} P v^*$$

Следовательно: нижняя граница средней стоимости всей программы поиска, начинающийся с контроля параметра Z_1 будет равна:

$$C_n(Z_1) = C \left[\sum_{S_i} P(S_i) + \sum_{\lambda=1}^{n-1} P \lambda^* + \sum_{v=1}^{N-1} P v^* \right]$$

Предположим, что контролируется параметр Z_1 . В результате этого множество возможных состояний разбивается на два подмножества $S_0(Z_1)$ и $S_1(Z_1)$, которые сведены в таблице 2:

| S_i | Z_1 | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Z_1 | Z_2 | Z_3 | Z_4 | Z_5 |
| S_1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| S_2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| S_3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| S_4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| S_5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| S_6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Где $S_1 - S_0(Z_1)$

$S_2 \dots S_6 - S_1(Z_1)$.

Последовательность значений вероятностей для $S_0(Z_1)$ будет состоять только из одного значения $P(S_1)=0,2$, а для $S_1(Z_1)$ составим такую последовательность: $P(S_2)=0,05$; $P(S_3)=0,06$; $P(S_4)=0,15$; $P(S_5)=0,24$; $P(S_6)=0,3$.

Определим $P_2^* = 0,11 + 0,15 = 0,26$ и так далее.

В итоге получим $P_1^* = 0,11$; $P_2^* = 0,5$; $P_3^* = 0,8$.

$$C_n(Z_1) = C \left[\sum_{S_i} P(S_i) + \sum_{\lambda=1}^n P^* \lambda + \sum_{v=1}^{N-1} P v^* \right] = C [1 + 0 + 1,67] = 2,67C$$

Следует отметить, что если $S_0(Z_1) = 1$ или $S_1(Z_1) = 1$, то $C_n(S_0) = C_n(S_1) = 0$.

Таким образом, определяются значения стоимости для нижней границы для программы поиска, начинающихся с контроля других параметров: (Z_2, Z_3, \dots, Z_5).

Вычислительные значения стоимостей для нижних границ программ поиска при контроле других параметров соответственно равны:

$$C'_n(Z_2) = 2,5C^* ; C_n(Z_2) = 2,66C ; C_n(Z_3) = 2,59C ; C_n(Z_4) = 2,6C ;$$

Следовательно минимальной стоимостью будет обладать программа поиска, начинающаяся с контроля параметра Z_5 . Построим таблицу контроля состояний подмножеств $S_0(Z_5)$ и $S_1(Z_5)$.

| S_i | Z_5 | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Z_5 | Z_1 | Z_2 | Z_3 | Z_4 |
| S_1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| S_2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| S_3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S_4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| S_5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| S_6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Где первые три строки – S_0 .

Вторые три строки – S_1 .

Анализ таблицы 3 показывает, что в случае отрицательного исхода при контроле параметра Z_5 следующими можно контролировать параметры Z_1 , Z_2 или Z_4 , так как последние два параметра эквивалентны по результатам контроля. Параметр Z_3 контролировать не имеет смысла, так как при этом подмножество $S_0(Z_5)$ – не разбивается на более мелкие области. Аналогично, в случае положительного исхода при контроле параметра Z_3 следующими можно контролировать параметры Z_3 и Z_4 , Z_1 и Z_2 контролировать так же не имеет смысла.

Таким образом, необходимо вычислить значения стоимостей нижних границ программ поиска при контроле таких наборов параметров: Z_5, Z_1, Z_3 ; Z_5, Z_1, Z_4 ; Z_5, Z_2, Z_3 ; Z_5, Z_2, Z_4 ;

Для чего следует пользоваться функцией:

$$C_*(Z_i, Z_k, Z_j) = [C \sum_{S_i \in S_0} P(S_i)] + C_*[Z_k; S_0(Z_i)] + C_*[Z_j; S_1(Z_i)]$$

где

$$C_*(Z_k, S_0(Z_i)) = C \sum_{S_k \in S_0} P(S_k) + C_*(S_k^{00}) + C_*(S_k^{0k})$$

$$C_*(Z_j, S_1(Z_i)) = C \sum_{S_j \in S_1} P(S_j) + C_*(S_j^{10}) + C_*(S_j^{11})$$

Суммы вероятностей состояний $P(S_i)$ и $P(S_j)$ объекта контроля, которые различаются контролем параметров Z_k и Z_j в подмножествах S_i^0 и S_j^1 соответственно.

Вычислим значение стоимостей нижних границ при контроле параметров: Z_5, Z_1, Z_3 . Контроль параметра Z_1 позволяет различить состояния S_1, S_2 и S_3 , следовательно:

$$\sum_{S_k \in S_1} P(S_k) = P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) = 0,2 + 0,05 + 0,06 = 0,31$$

Так же при контроле параметра Z_1 выделяется из подмножества $S_0(Z_5)$ только одно состояние $S_1^{00} \rightarrow S_1$, тогда $S_*(S_1^{00}) = 0$. Значение $S_*(S_1^{01})$ вычисляется аналогичным образом, как и $S_*(S_1^0)$, т.е.

$$C_*(S_1^{01}) = C \sum_{v=1}^k P^* v = C[P(S_2) + P(S_3)] = C(0,05 + 0,06) = 0,11C$$

Кроме того при отрицательном исходе из подмножества выделяется только одно состояние (Z_5), следовательно:

$$S_*(S_1^{10}) = C_*(S_1^{10}) = 0$$

$$C_*(S_1^{11}) = C \sum_{v=1}^k P^* v = C[P(S_4) + P(S_6)] = C(0,15 + 0,3) = 0,45C$$

Тогда значение стоимости нижней границы будет равно:

$$C_*(Z_5, Z_1, Z_3) = C(1 + 0,31 + 0,11 + 0,69 + 0,45) = 2,56C$$

При контроле других возможных последовательностей вычисление осуществляется таким образом. Для данного примера получены такие результаты.

$$C_*(Z_5, Z_1, Z_4) = 2,5C$$

$$C_*(Z_5, Z_1, Z_4) = 2,7C$$

$$C_*(Z_5, Z_2, Z_4) = 2,64C$$

Анализируя их, приходим к выводу, что минимальной средней стоимостью будет обладать программа поиска, осуществляющая контроль параметров последовательности Z_5, Z_1, Z_4 . Вновь составим таблицу неисправностей в соответствии с результатами контроля параметров в последовательности Z_5, Z_1, Z_4 :

Табл. 4.

| S_i | Z_i | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Z_3 | Z_1 | Z_4 | Z_2 | Z_3 |
| S_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| S_2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| S_3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S_3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| S_4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| S_6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Первая строка - $S^{00}(Z_3, Z_1)$

Вторая и третья - $S^{01}(Z_3, Z_1)$

Четвертая и пятая - $S^{10}(Z_3, Z_4)$

Шестая - $S^{11}(Z_3, Z_4)$

Из табл. 4 видно, что при отрицательном исходе контроля параметров Z_3, Z_1 , выделяется состояние S_1 , а при отрицательном исходе параметра Z_3 и положительном исходе контроля Z_1 необходимо следующим контролировать параметр Z_2 , так как контроль параметра Z_3 не позволяет разделить оставшееся подмножество на более мелкие.

Аналогично, при положительном исходе контроля параметров Z_3, Z_4 выделяется состояние S_6 , а при положительном исходе контроля параметров Z_3 и отрицательном исходе контроля параметра Z_4 , необходимо контролировать параметр Z_1 .

Поскольку в данном случае других вариантов нет, то на этом заканчивается построение программы поиска неисправностей, обладающей минимальной средней стоимостью. Таким образом, последовательность контроля параметров Z_3, Z_1, Z_4, Z_2, Z_3 изображается в следующем виде:

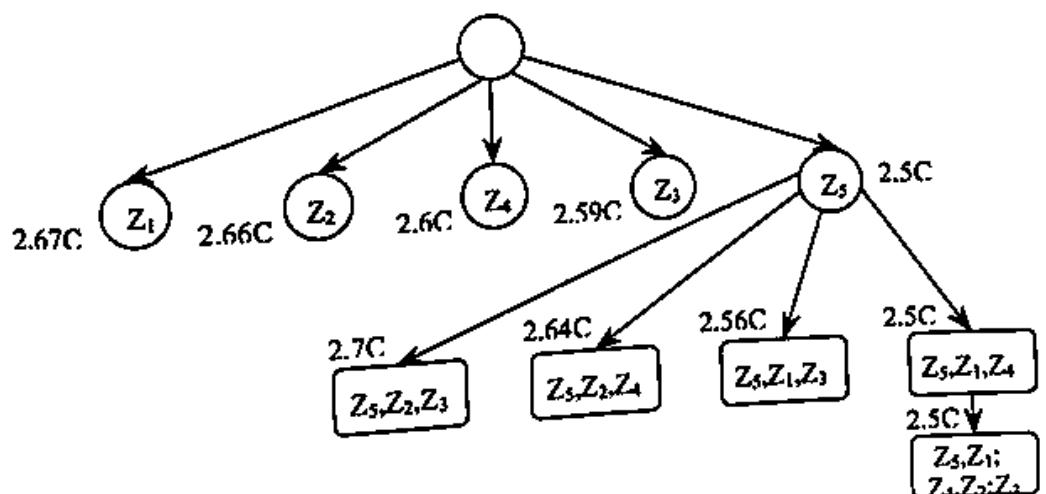


Схема построения программы поиска, методом ветвей и границ. Такая последовательность дает среднюю стоимость, равную:

$$C = P(S_1)(C_1 + C_3) + [P(S_2) + P(S_3)](C_2 + C_1 + C_3) + P(S_6)(C_4 + C_3) + [P(S_3) + P(S_4)](C_3 + C_4 + C_3) = 2.5C$$

Следует заметить, что при построении программ поиска рассмотренным методом значение средней стоимости нижней границы на последующих шагах всегда не меньше значения средней

стоимости нижней границы на предыдущих шагах:

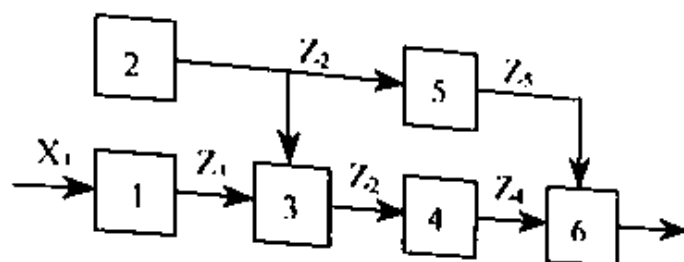
$$C_{ik}(Z_i, Z_k, Z_j) \geq C_{ik}(Z_i)$$

Это условие используется для контроля правильности выполненных вычислений.

4. Экспериментальная часть.

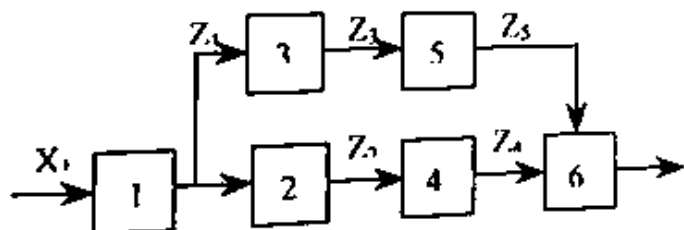
9

Рассчитать программу поиска неисправностей методом ветвей и границ и начертить ее для следующих функциональных моделей и таблиц состояний:
Вариант 1.



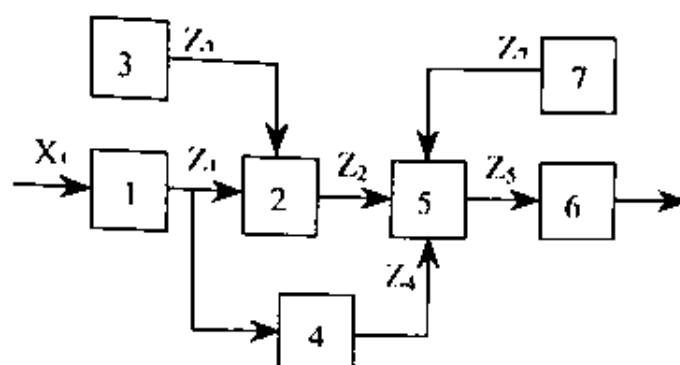
| S | Z _i | | | | | P(S _i) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₄ | Z ₅ | |
| S ₁ | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0,08 |
| S ₂ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 |
| S ₃ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0,25 |
| S ₄ | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0,2 |
| S ₅ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,15 |
| S ₆ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 |

Вариант 2.



| S | Z _i | | | | | P(S _i) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₄ | Z ₅ | |
| S ₁ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,35 |
| S ₂ | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,21 |
| S ₃ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,01 |
| S ₄ | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0,17 |
| S ₅ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,06 |
| S ₆ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,2 |

Вариант 3.



| S | Z _i | | | | | P(S _i) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₄ | Z ₅ | |
| S ₁ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,32 |
| S ₂ | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0,24 |
| S ₃ | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,1 |
| S ₄ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,15 |
| S ₅ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,03 |
| S ₆ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,16 |

5. Контрольные вопросы

1. Какие составляющие, содержит оценка нижней границы стоимости программы, поиска неисправностей?
2. Какой оценке соответствует сумма бинарных вероятностей.
3. Как изменяется оценка нижней границы при продвижении от корневой вершины к конечной вершине?
4. В чем состоит различие в оценке нижней границы при одинаковых и различных стоимостях проверок?
5. За счет чего возможно сокращение вариантов программ при поиске оптимального решения?