

чине t_{om} будет равна периодичности контроля отказа отдельных элементов t_{oi} :

$$t_{om} = t_{oi}, i=1,2,\dots,m \quad (2.5.9)$$

2 стратегия - все каналы проверяются с одинаковой периодичностью t_{oi} , но моменты проверок различных каналов сдвинуты на равные промежутки времени t относительно друг друга;

$$t = t_{oi}/N \quad (2.5.10)$$

Учитывая то, что возникновение события отказа по общей причине равновероятно на интервале наблюдения t_{oi} , период контроля такого события t_{om} определяется как средневзвешенный по множеству периодов между проверками каналов:

$$t_{om} = \left(\sum_{l=1}^k \frac{(k_l+1)^2}{N^2} \right) * t_{oi} \quad (2.5.11)$$

где k_1 - число проверяемых подряд каналов без отказавших элементов на 1-ом шаге, начиная с последнего момента проверки одного из m элементов;

k - общее число шагов:

$$\sum_{l=1}^k (k_l+1) = N$$

Если отказавшие элементы имеются во всех каналах (т.е. $k_1=0$), то формула 2.5.11 приобретает вид:

$$t_{om} = \left(\sum_{l=1}^N \frac{1}{N^2} \right) * t_{oi} = \frac{t_{oi}}{N} \quad (2.5.12)$$

2 стратегия может предусматривать внеочередные проверки всех каналов при обнаружении отказавшего элемента в одном из них. В этом случае будет одновременное обнаружение отказа всех периодически контролируемых элементов. В противном случае будет неполное вы-

явление отказов таких элементов, и, соответственно, возможно восстановление только части элементов до момента проверки остальных.

Отдельную задачу представляет собой оценка времени восстановления для событий с отказами по общей причине. В качестве ее иллюстрации рассмотрим четырехканальную систему с двумя группами элементов, подверженных отказам по общей причине (NN I-4 и 5-12, соответственно, на рис.2.8).

Пусть система имеет эффективность $4 \times 50\%$. В этом случае для выполнения системой заданных функций требуется работа двух из четырех каналов, и, соответственно, система отказывает при отказе 3-х из 4-х каналов. Таким образом, минимальные сечения, составленные только из независимых отказов, содержат от 3-х до 6-ти элементов, например: $\langle 1,2,3 \rangle$, $\langle 2,3,5,6 \rangle$, $\langle 5,6,7,8,9,10 \rangle$ и т.п. При этом восстановление любого из отказавших элементов, составляющих минимальное сечение, приводит к исчезновению последнего. Аналогичный принцип должен распространяться на отказы по общей причине. Поэтому время восстановления таких событий должно определяться с таким расчетом, чтобы восстановление отказавших элементов вследствие воздействия общей причины приводило бы к исчезновению минимального сечения, т.е. к переходу системы безопасности в работоспособное состояние.

Такой принцип порождает проблему определения числа элементов, которое требуется восстановить для исчезновения минимального сечения. Рассмотрим, например, событие C_{34} отказа по общей причине двух элементов NN 3,4. Для минимального сечения $\langle C_{34}, 5,6 \rangle$ событие C_{34} и отказ системы перестают существовать при восстановлении уже одного из элементов 3,4. Однако, для минимального сечения $\langle C_{34}, C_{5678} \rangle$ необходимо восстановление и элемента 3, и элемента 4 для устранения отказа системы. Таким образом, параметры события C_{34} зависят от минимального сечения, в которое оно входит. Поэтому, строго говоря, его нельзя рассматривать как элементарное

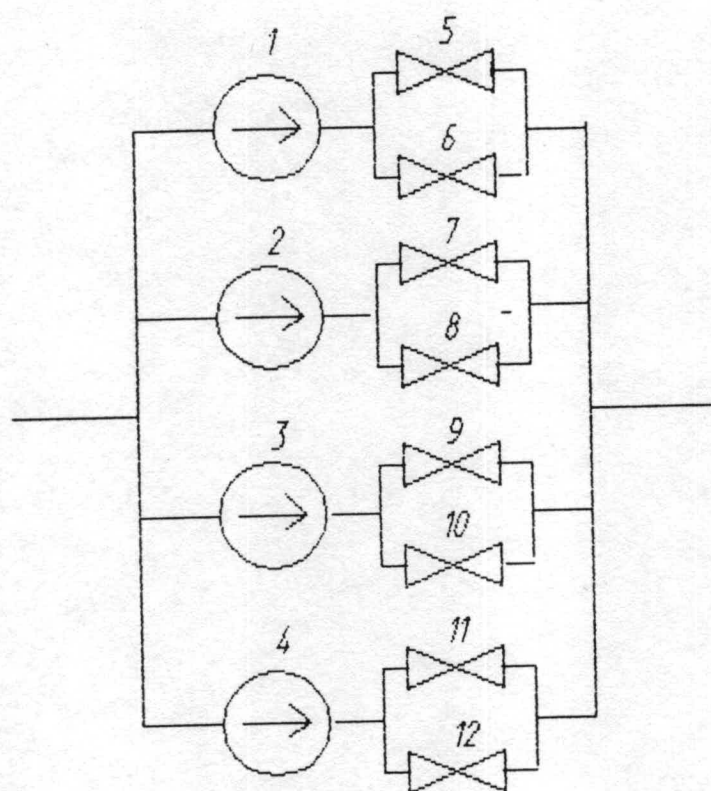


Рис.2.8. Структурная схема четырехканальной системы, состоящей из 4 одинаковых насосов и 8 одинаковых задвижек.

(первичное) событие подобно независимым отказам.

Однако, проблема обработки логических моделей больших размеров при проведении ВАБ приводит к необходимости разработки приближенной модели восстановления, в которой сложные события типа $C_{34}, C_{234}, C_{1234}$ и т.п. рассматривались бы в качестве первичных. Возможны два подхода к решению этой задачи.

Первый метод определения среднего времени предполагает, что по мере восстановления элементов, отказавших по общей причине, реализуется цепочка событий с убывающим количеством элементов, например, событие C_{1234} переходит в событие C_{234} , далее в C_{34} и C_4 . В этом случае необходимо учитывать, что событие C_{34} может возникнуть не только вследствие соответствующего отказа по общей причине этой пары элементов, но и вследствие восстановления одного из элементов в событиях C_{134} и C_{234} .

Использование вышеуказанного метода предполагает осуществление следующих процедур для каждого отказа по общей причине:

- проведение поиска событий, в которые он может перейти после восстановления одного из элементов;
- определение интенсивности каждого такого перехода;
- увеличение параметра, характеризующего мгновенную неготовность (интенсивность явных отказов) для событий, в которые переходит рассматриваемый отказ по общей причине.

Такая процедура позволяет легко определить время восстановления для событий с отказами по общей причине, однако, является чрезвычайно трудоемкой при моделировании реальных задач.

Поэтому в методике был реализован второй более простой способ, который предполагает, что событие отказа по общей причине существует вплоть до исчезновения условия отказа системы безопасности. В этом случае среднее время восстановления t_B определяется как среднее время, требуемое на восстановление элементов в определенном

числе каналов системы безопасности.

При этом должны учитываться регламентные ограничения при устранении отказов в режиме ожидания. Одно из ограничений связано с допустимым числом неработоспособных каналов, при превышении которого реактор должен быть переведен в безопасное состояние. В случае, если обнаруженный в режиме ожидания отказ по общей причине нарушает это требование, время его существования t_b определяется как:

$$t_b = \min(t_B, t_G) \quad (2.5.13)$$

где t_G - время перевода реактора в безопасное состояние.

Другое ограничение связано с допустимым временем ремонта неработоспособного канала, при превышении которого реактор также должен быть остановлен. В этом случае время существования события отказа t_b , учитываемое в модели, определяется из соотношения:

$$t_b = \min(t_B, t_D + t_G) \quad (2.5.14)$$

где t_D - допустимое время ремонта в режиме ожидания при работе реактора на мощности.

Время восстановления отказа по общей причине зависит от стратегии ремонта отказавших элементов. В настоящей работе рассмотрены две стратегии восстановления - последовательная и параллельная.

Первая стратегия, являющаяся наиболее консервативной, предусматривает, что одновременно восстанавливается только один элемент, и восстановление каждого последующего элемента начинается в момент окончания предыдущего. Очередность восстановления отказавших элементов определяется:

- очередностью отказов в случае их раздельного обнаружения;
- случайным выбором для восстановления отказавшего канала, а в составе канала - случайным выбором отказавшего элемента.

Восстановление каждого последующего канала начинается после восстановления предыдущего.

Такая последовательная стратегия реальна в условиях ограниченности ресурсов ремонта: ограниченного числа ремонтных бригад, не позволяющего производить параллельное восстановление отказавших элементов; малого времени для принятия решения, не позволяющего определить оптимальную очередность для восстановления элементов и т.п.

При моделировании этой стратегии предполагается равновероятность выбора отказавшего элемента, с которого начинается процесс восстановления. В дальнейшем восстанавливаются элементы этого же канала до полного восстановления работоспособности последнего. В случае, если для восстановления работоспособности системы достаточно восстановление работоспособности одного канала, то среднее время устранения отказа по общей причине оценивается по формуле:

$$t_B = \frac{I}{N} * \sum_{l=1}^N t_{B_l} \quad (2.5.15)$$

где t_{B_l} - среднее время восстановления всех элементов в одном канале;

N - число каналов.

В свою очередь:

$$t_{B_l} = \sum_{i=1}^{n_l} t_{B_i} \quad (2.5.16)$$

где t_{B_i} - среднее время восстановления i -го элемента канала;

n_l - число отказавших в канале элементов.

Объединяя две формулы в одну, получим окончательно:

$$t_B = \frac{I}{N} * \sum_i t_{B_i} \quad (2.5.17)$$

где суммирование производится по всем элементам, отказавшим в событии.

Применение этой стратегии для случая, когда необходимо восстановление элементов в k каналах из N приводит к результату:

$$t_B = \frac{k}{N} * \sum_i t_{Bi} \quad (2.5.18)$$

Стратегия параллельного восстановления, являющаяся наиболее оптимистической, предусматривает, что восстановление всех отказавших элементов начинается и производится одновременно. Эта стратегия предполагает неограниченность ресурсов ремонта. Случайное время до ликвидации события с отказом по общей причине при параллельной стратегии восстановления (в случае достаточности восстановления работоспособности одного канала для восстановления работоспособности системы) может быть выражено:

$$\tau_B = \min_{1 \leq i \leq N} \max_{1 \leq j \leq k_i} \tau_{ij} \quad (2.5.19)$$

где τ_{ij} - случайное время восстановления j -го элемента i -го канала;

N - число отказавших каналов;

k_i - число элементов, отказавших в i -м канале.

Достаточно точная и эффективная оценка $t_B = M[\tau_B]$ может быть получена путем принятия следующих приближенных соотношений:

$$t_B = \left(\sum_{i=1}^N \mu_i \right)^{-1} \quad (2.5.20)$$

$$\mu_i = \left(M \left[\max_{1 \leq j \leq k_i} \tau_{ij} \right] \right)^{-1} = \left\{ \max_{1 \leq j \leq k_i} \{ t_{Bij}^* ; t_{Bi}^* \ln \left[\frac{3}{2} * (k_i + 1) \right] \} \right\}^{-1} \quad (2.5.21)$$

$$t_{Bi}^* = \frac{1}{k_i} * \sum_{j=1}^{k_i} t_{Bij} \quad (2.5.22)$$

где μ_i - интенсивность восстановления работоспособности i -го канала;

$t_{B_{ij}}$ - среднее время восстановления j -го элемента в i -м канале.

Определение максимума случайной величины τ_{ij} через максимумы средних времен восстановления значительно упрощает инженерные расчеты. В то же время погрешность приближенных формул по сравнению с точными оценками для реальных задач не превышает 10%. Первый член $t_{B_{ij}}$ под знаком максимума в формуле (2.5.21) является определяющим при большом разбросе значений средних времен восстановления элементов, когда среднее время восстановления канала стремится к значению среднего времени восстановления наиболее длительно восстанавливаемого элемента.

Второй член $t_{B_i} * \ln\left[\frac{3}{2} * (k_i + 1)\right]$ под знаком максимума в формуле (2.5.21) является определяющим при равных или близких значениях средних времен восстановления элементов. Он выведен на основе соотношений для установившегося режима полумарковского процесса, полученных в /138/. Рассмотрим событие отказа по общей причине n элементов одного канала, имеющих одинаковые значения средних времен восстановления $t_{B_{ij}} = 1/\mu_j = \text{const.}$

Граф состояний процесса устранения такого отказа представлен на рис.2.9. Математические ожидания случайных величин, характеризующих полумарковский процесс, описывается следующей системой уравнений /138/:

$$M[\rho_{i0}] = M[\xi_i] + \sum_{k=0} \pi_{ik} * M[\rho_{k0}] \quad (2.5.23)$$

где $M[\rho_{i0}]$ - математическое ожидание случайной величины ρ_{i0} , равной времени от момента попадания процесса в i -ое состояние до перехода в поглощающее 0-ое состояние, т.е. в данном случае, в работоспособное состояние канала;

$M[\xi_i]$ - математическое ожидание времени нахождения канала

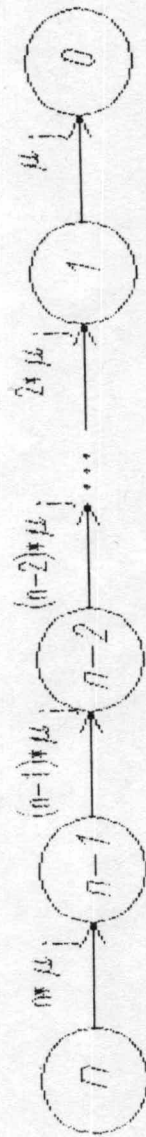


Рис.2.9. Граф состояний процесса устранения отказа n элементов по общей причине при параллельной стратегии восстановления

n - исходное отказовое состояние системы

$n-1, n-2, \dots$ - полный набор отказовых состояний канала с числом отказавших элементов $n-1$, $n-2$ и т.д.

0 - работоспособное состояние канала,

$n * \mu, (n-1) * \mu, \dots$ - интенсивности переходов.

в i -ом состоянии;

π_{ik} - одношаговые вероятности перехода канала из i -го в k -ое состояние.

Вероятности π_{ik} обладают свойством нормировки $\sum_k \pi_{ik} = 1$.

Система уравнений (2.5.23) позволяет вычислить среднее время восстановления канала t_{B_i}

$$t_{B_i} = M [\rho_{no}] = \frac{1}{\mu_j} \left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n} \right] \quad (2.5.24)$$

Наиболее близко ряд обратных величин натуральных чисел аппроксимируется логарифмической зависимостью:

$$t_{B_i} = \frac{1}{\mu_j} * \ln \left[\frac{3}{2} * (n+1) \right], \quad (2.5.25)$$

которая использована в формуле (2.5.21).

2.6. Разработка метода введения отказов по общей причине в логическую модель.

При разработке метода введения событий отказов по общей причине в логическую модель преследовались следующие цели:

1) создать алгоритм, позволяющий адекватно отражать специфику детальных моделей отказов по общей причине при моделировании путей развития аварии;

2) ограничить объем вычислений уровнем, не превышающим возможности персональной ЭВМ типа РС/АТ-386;

3) исключить ошибки вследствие логической переоценки или недооценки;

4) минимизировать трудозатраты при использовании метода.

Этих целей позволяет достичь неявный способ ведения отказов по общей причине в логическую модель, который основывается на предварительном получении набора элементарных минимальных сечений, составленных только из независимых отказов и характеризующих условия реализации путей развития аварии (отказа системы). Суть способа заключается в генерации и количественной оценке уникального и достаточно полного набора дополнительных минимальных сечений, содержащих отказы по общей причине, на основании относительно простой логической и количественной информации. Эта информация представляет собой:

а) дерево отказов или соответствующий ему набор базовых минимальных сечений, составленных только из независимых отказов;

б) количественные характеристики независимых отказов;

в) параметрические модели, характеризующие интенсивности (вероятности) возникновения отказов по общей причине;

г) идентификаторы, на основании которых образуются дополнительные сечения.

Предлагаемый способ позволяет значительно сократить размеры логической модели и прост в использовании. Однако, его реализация потребовала разработки специальных алгоритмов для решения двух задач:

а) формирования уникального и достаточно полного набора дополнительных минимальных сечений, составленных с учетом отказов вследствие воздействия различных классов общих причин;

б) достаточно точного определения ряда характеристик (типа и периодичности контроля, времени устранения) событий отказа по общей причине в генерируемых дополнительных сечениях.

Принципы, на которых основывается решение второй задачи, рассмотрены ранее в разделе 2.5, а для решения первой задачи разработан изложенный ниже алгоритм /19,28/.

Каждому первичному событию (независимому отказу) элементарного дерева отказов может присваиваться один или несколько идентификаторов, позволяющих судить о подверженности этого элемента воздействию каких-либо общих причин. Если базовое минимальное сечение содержит отказы двух или более элементов, подверженных воздействию хотя бы одного класса общих причин (т.е. имеющих одинаковый идентификатор), то производится генерация дополнительных сечений, содержащих отказы по общей причине вместо независимых отказов соответствующих элементов. Например, пусть существует базовое минимальное сечение

$$\langle \left(\prod_{i=1}^m X_i \right) \wedge \left(\prod_{j=1}^n Z_j \right) \rangle \quad n \geq 2 \quad (2.6.1)$$

где X_i - независимые отказы элементов, не подверженных воздействию общей причины;

Z_j - независимые отказы элементов, подверженных воздействию одного класса общих причин (т.е. образующих одну группу общих причин).

Тогда должен быть образован набор дополнительных вложенных минимальных сечений (т.е. сечений, в которых отказы по общей причине охватывают только элементы, составляющие базовое минимальное сечение). Этот набор включает сечение с полным отказом группы элементов $\{z_j\}$ по общей причине:

$$\langle \left(\prod_{i=1}^m X_i \right) \wedge C_{\{z_1 \dots z_n\}} \rangle \quad (2.6.2)$$

где $C_{\{z_1 \dots z_n\}}$ - событие отказа по общей причине элементов $z_1, \dots, z_n$.

Следует отметить, что в группе элементов, подверженных воздействию одного класса общих причин, может возникнуть несколько независимых событий отказов по общей причине. Поэтому в случае, если в группу общих причин входят более двух элементов ($n > 2$), то образуется ряд дополнительных вложенных сечений, имеющих один из двух видов:

$$\langle \left(\prod_{i=1}^m X_i \right) \wedge \left(\prod_{jk=1}^{jk \leq n-2} C_{jk\{z_{jc}\}} \right) \wedge \left(\prod_{jn=1}^{jn \leq n-2} Z_{jn} \right) \rangle, \quad \begin{matrix} Z_{jn} \in \{z_j\} \\ Z_{jn} \in \{z_{jc}\} \end{matrix} \quad (2.6.3)$$

$$\langle \left(\prod_{i=1}^m X_i \right) \wedge \left(\prod_{jk=2}^{2 \leq jk \leq n-1} C_{jk\{z_{jc}\}} \right) \rangle, \quad \begin{matrix} \text{или} \\ Z_{jc} \in \{z_j\} \end{matrix}$$

где jk - число событий отказов по общей причине в дополнительном сечении;

$\{z_{jc}\}$ - элементы, отказавшие по общей причине в событии C_{jk} ;

Z_{jn} - независимые отказы элементов, входящих в группу общей причины;

jn - число независимых отказов элементов, входящих в группу общей причины.

Множества $\{z_{j0}\}$ и $\{z_{jn}\}$ являются непересекающимися в каждом дополнительном сечении, а их сумма образует множество $\{z_j\}$ в базовом минимальном сечении.

Спецификой отказов по общей причине является возможность частичного наложения событий друг на друга. Например, в одном минимальном сечении могут существовать первичные события C_{12} и C_{23} , т.е. отказы пары элементов 1 и 2 и пары 2 и 3 по общей причине. Этим определяется максимальное число возможных независимых событий j_k отказов по общей причине в одном дополнительном вложенном минимальном сечении.

Другой особенностью отказов по общей причине является наличие первичных событий, выходящих за рамки базового минимального сечения с независимыми отказами, т.е. включающих в себя не только элементы из базового сечения, но и дополнительные элементы из моделируемой группы общей причины. В силу первичности таких событий образованные с их учетом дополнительные сечения (которые далее именуются объемлющими) будут минимальными. Таким образом, если существуют независимые отказы элементов $\{z_j\}$ ($j=n+1, \dots, 1$), подверженных воздействию рассматриваемой общей причины, но не входящих в базовое минимальное сечение, то должен генерироваться набор объемлющих дополнительных минимальных сечений:

$$\langle \left(\prod_{i=1}^m X_i \right) \wedge \left(\prod_{jk=1}^{jk \leq n-2} C_{jk}\{z_{j0}\} \right) \wedge \left(\prod_{jn=1} z_{jn} \right) \rangle, z_{jn} \in \{z_{j0}\} \quad (2.6.4)$$

$$\langle \left(\prod_{i=1}^m X_i \right) \wedge \left(\prod_{jk=1}^{jk \leq n-1} C_{jk}\{z_{j0}\} \right) \rangle, \quad \begin{aligned} z_{j0} &\in \{z_j\}, j=1, \dots, n, \dots, 1 \\ z_{jn} &\in \{z_j\}, j=1, \dots, n \\ 1 &> n \end{aligned}$$

При этом каждое событие отказа по общей причине $C_{jk}\{z_{jk}\}$, образующее дополнительное сечение, должно включать отказ по крайней

мере, одного элемента из базового минимального сечения z_{j_0} ($j_0 \leq n$).

Изложенное выше относится к случаю, когда в исходном базовом минимальном сечении присутствуют отказы одной группы двух или более элементов, подверженных воздействию одного класса общих причин. Если таких групп несколько, или если одна группа подвержена воздействию нескольких классов общих причин, то генерируются аналогичные рассмотренным выше дополнительные сечения со всеми возможными комбинациями событий отказов различных групп элементов по общим причинам различных классов.

При разработке алгоритма формирования набора дополнительных минимальных сечений необходимо решение двух задач:

а) проверки генерируемых сечений на минимальность и уникальность;

б) просеивания (отбрасывания незначимых) сечений.

Эти задачи взаимосвязаны. Проверка на уникальность необходима, т.к. из различных базовых минимальных сечений могут генерироваться одинаковые объемлющие сечения. Однако, большое количество сечений, образующихся при моделировании реальных задач, не позволяет образовывать необходимый для такой проверки их полный массив. Это связано с ограничениями по быстродействию и памяти ЭВМ. Поэтому некоторые этапы просеивания должны предшествовать такой проверке.

На основании практики вероятностных анализов безопасности АЭС в институте "Атомэнергoproject" выработаны следующие критерии предварительного просеивания:

а) по наличию в дополнительном сечении событий отказов по общей причине, распространяющихся только на один элемент из базового минимального сечения. Это связано с тем, что вероятность независимого отказа любого элемента значительно больше любого отказа по общей причине, распространяющегося на этот элемент, и, значит, существует сечение, значительно более значимое, чем отброшенное;

б) по наличию в дополнительном сечении нескольких отказов по разным общим причинам, когда элементы, образующие одно событие, полностью повторяют все или часть элементов, образующих другие события;

в) по наличию в сечении двух и более независимых событий с отказами по одной общей причине. Для доказательства корректности последнего критерия рассмотрим следующую довольно распространенную схему (см. рис. 2.10) части трехканальной системы, имеющую эффективность $3 \times 100\%$ и состоящую из последовательно расположенных в каждом канале двух задвижек. Пусть все эти шесть элементов подвержены воздействию одной общей причины, вероятность независимого отказа любого из элементов равна $q_1 = 5 \times 10^{-3}$, а вероятность отказа по общей причине конкретных комбинаций элементов q_i (где i — число элементов в комбинации) равны:

$$q_2 = 1 \times 10^{-4}$$

$$q_3 = 5 \times 10^{-5}$$

$$q_4 = 0$$

$$q_5 = 0$$

$$q_6 = 1 \times 10^{-5}$$

Для такой схемы образуются 8 минимальных сечений с независимыми отказами и 392 дополнительных уникальных сечений. Из таблицы 2.1 видно, что даже для консервативно выбранного в примере небольшого различия между вероятностями независимого отказа и отказов по общей причине 223 сечения, включающих в себя 2 или 3 события отказа по общей причине, вносят около 0,3% вклад в суммарную неготовность. Это позволяет значительно уменьшить число рассматриваемых дополнительных сечений.

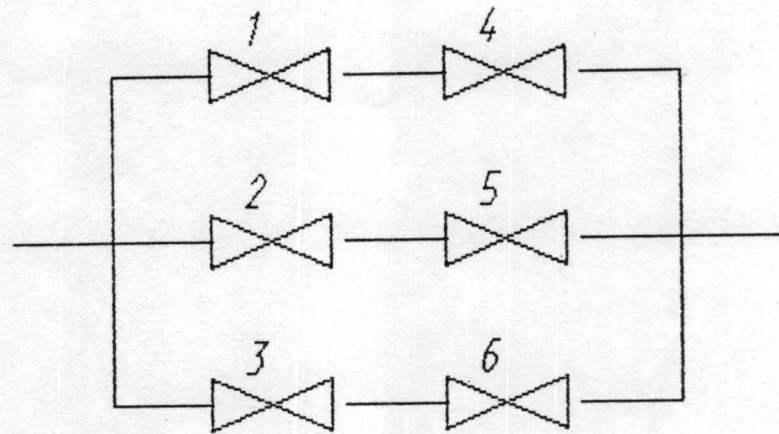


Рис.2.10. Структурная схема трехканальной системы, состоящей из 6 одинаковых задвижек.

Таблица 2.1

Минимальные сечения системы, изображенной
на рис.2.10, с эффективностью 3х100%.

Тип минимального сечения	Число минимальных сечений	Неготовность одного минимального сечения	Суммарная неготовность минимальных сечений этого типа	%
Независимые отказы <1,2,3>	8	⁻⁷ 1,25х10	⁻⁶ 1х10	0,2
Вложенные сечения <С> 123	8	⁻⁵ 5х10	⁻⁴ 4х10	93
<С,3> 12	24	⁻⁷ 5х10	⁻⁵ 1,2х10	2,8
<С,С> 12 23	24	⁻⁸ 1х10	⁻⁷ 2,4х10	0,06
Объемлющие сечения <С> 123456	1	⁻⁵ 1х10	⁻⁵ 1х10	2,3
<1,С> 236	24	⁻⁷ 2,5х10	⁻⁶ 6х10	1,4
<С,С> 12 34	36	⁻⁸ 1х10	⁻⁷ 3,6х10	0,08
<С,С> 12 236	72	⁻⁹ 5х10	⁻⁷ 3,6х10	0,08
<С,С> 12 356	36	⁻⁹ 5х10	⁻⁷ 1,8х10	0,04
<С,С> 124 136	42	⁻⁹ 2,5х10	⁻⁷ 1,05х10	0,02
<С,С> 124 356	6	⁻⁹ 2,5х10	⁻⁸ 1,5х10	0,003
<1,2,С> 36	12	⁻⁹ 2,5х10	⁻⁸ 3х10	0,007
<1,С,С> 25 36	6	⁻¹¹ 5х10	⁻¹⁰ 3х10	
<С,С,С> 14 25 36	1	⁻¹² 1х10	⁻¹² 1х10	
Всего:	300		⁻⁴ 4,3х10	100

Проверка на минимальность и уникальность генерируемых дополнительных сечений не представляет алгоритмической сложности. Эта процедура осуществляется путем сравнения элементов вновь генерируемого сечения с генерированными ранее. В случае, если существует полное совпадение элементов в каком-либо из ранее генерированных сечений с частью или со всеми новыми элементами нового сечения, то последнее не будет являться, соответственно, минимальным или уникальным.

Основная сложность процедур проверки на минимальность и уникальность заключается в необходимости обработки и хранения больших массивов информации. Для сокращения объема вычислений предусмотрено осуществление проверки только для значимых сечений, определяемых на основании сравнения грубых оценок их вероятностей. Опыт расчетов показывает, что 1000 наиболее значимых сечений вносят вклад свыше, чем 99,7% в суммарный результат /26/. Поэтому обработка только 1000 наиболее значимых сечений обеспечивает удовлетворительную точность результата. Сечения, имеющие меньшую вероятность реализации, должны отбрасываться без проверки на минимальность и уникальность при количественном просеивании.

2.7. Разработка программы анализа функциональных зависимостей.

Методика анализа функциональных зависимостей, изложенная в разделе 2.4, реализована в программе APRA (латинская аббревиатура русских слов "Анализ Путей Развития Аварии"). Программа APRA предназначена для анализа модуляризованных структурно-функциональных схем или деревьев отказов, генерации полного набора модульных минимальных сечений и его предварительного просеивания. Программа APRA позволяет проводить одновременный поиск минимальных сечений для развернутых логических диаграмм с несколькими вершинными событиями.

Программа APRA является составной частью программного комплекса VEGA, предназначенного для проведения вероятностных анализов безопасности АС, и совместима с другими расчетными программами (в том числе, с рассмотренной в разделе 2.8 программой COCAFAN) и с графическими редакторами программного комплекса VEGA. Программа APRA написана на языке Фортран-77 и реализована на персональной ЭВМ типа IBM PC/AT/386 в операционной системе OS2. Объем исполняемого модуля программы APRA составляет 400 кБт.

Блок-схема программы APRA представлена на рис.2.11. Алгоритм выбора минимальных сечений относится к классу "UP" алгоритмов, т.е. предполагает анализ логической диаграммы снизу к вершинному событию. Для его реализации каждому логическому оператору диаграммы присваивается ранг (степень удаления от низа диаграммы). Подпрограмма CODE

обеспечивает определение характеристик отдельных модулей: типа (оборудование или логический оператор), ранга и порядкового номера оператора в пределах одного ранга, номера присоединенных элементов для модулей типа "оборудование".

Подпрограмма MULT обеспечивает формирование и накопление сечений для текущего j-го оператора i-го ранга. Каждое сечение кодиру-

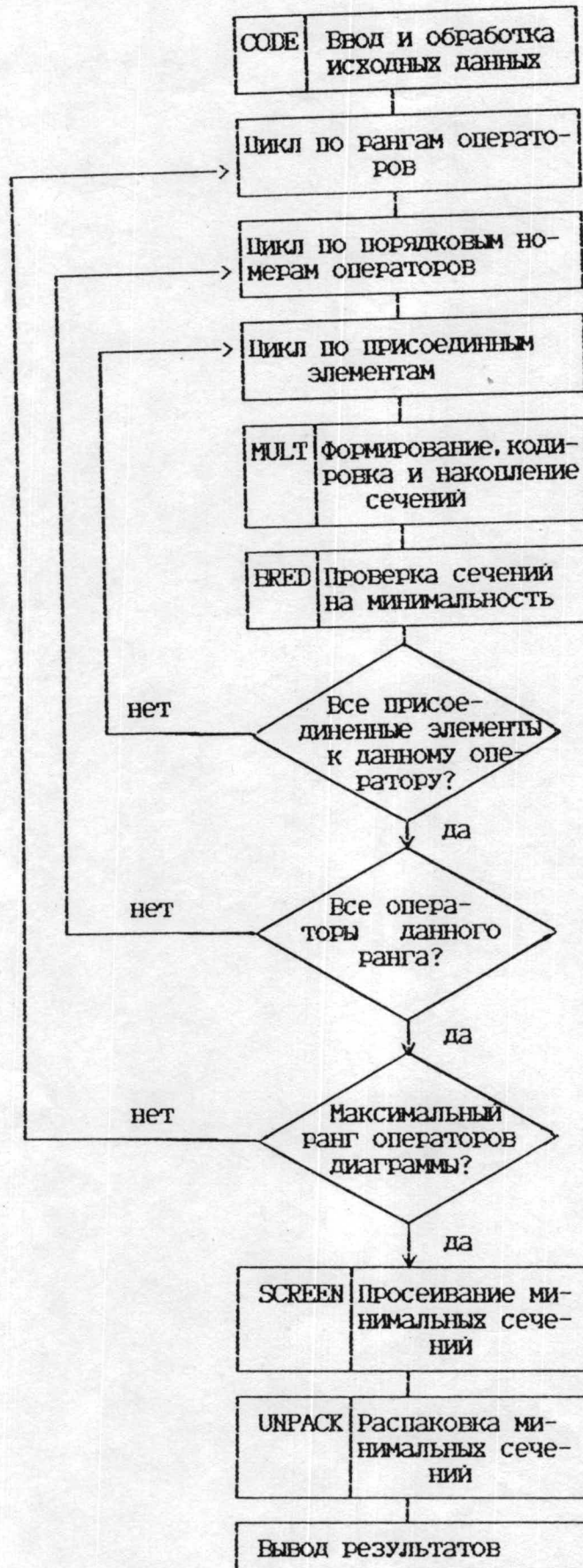


Рис. 2. 11. Блок-схема программы APRA.

ется в виде произведения простых чисел, соответствующих порядковым номерам оборудования (на диаграмме), входящего в сечение. Метод кодировки базируется на теореме о единственности разложения целого числа на простые множители.

Подпрограмма BRED осуществляет проверку генерируемых сечений на минимальность. Алгоритм проверки заключается в поочередном делении произведения простых чисел, характеризующих текущее сечение, на произведения, характеризующие предыдущие сечения (расположенные в порядке возрастания). В случае деления нацело без остатка, текущее сечение исключается из рассмотрения как неминимальное.

Подпрограмма SCREEN осуществляет грубое просеивание по вероятности реализации сформированного полного массива модульных минимальных сечений. Принципы просеивания изложены в разделе 2.4. Критерии исключения сечений из дальнейшего рассмотрения могут варьироваться пользователем в зависимости от задач исследования.

Подпрограмма UNPACK осуществляет распаковку минимальных сечений, т.е. их представление в приемлемом виде для работы других программ программного комплекса VEGA. Распаковка производится путем деления числа, кодирующего состав сечения, поочередно, на простые множители до полного определения состава сечения. Порядковые номера простых делителей числа характеризуют модули, образующие минимальное сечение.

Программа APRA имеет следующие ограничения:

- число генерируемых минимальных сечений не более 1000;
- общее число элементов исходной логической диаграммы - не более 50;
- число рангов операторов - не более 9.

2.8. Описание программы анализа отказов по общей причине.

Рассмотренные в разделах 2.5-2.6 методики моделирования отказов по общей причине были реализованы в различных версиях программы СОСАFAN (аббревиатура COmmon CAuse Failure ANalysis, в переводе на русский язык - анализ отказов по общей причине) /21/. Программа СОСАFAN предназначена для расчета показателей структурной надежности систем безопасности АС по отношению к отказам типа несрабатывания, среди которых возможны независимые отказы и множественные отказы, вызванные воздействием общих физических или антропогенных причин.

Разработано несколько версий программы:

- 1) СОСАFAN1 - работающая в составе программного комплекса VEGA, предназначенного для расчета вероятностей реализации путей развития аварии;
- 2) СОСАFAN2 - автономная для расчета показателей надежности систем безопасности (см. рис. 2.12);
- 3) СОСАFAN3 - работающая совместно с программой VNF /19,21/, осуществляющей более точный расчет вероятностей реализации минимальных сечений.

Программа СОСАFAN написана на языке Фортран-77 для персональной ЭВМ типа PC/AT/386 в операционной системе OS2. Исполняемый файл 2-ой версии программы СОСАFAN занимает объем 175 кБт.

Программа СОСАFAN позволяет моделировать одну или несколько общих причин, воздействующих на различные по составу группы из 2-х и более элементов рассматриваемой системы. При этом каждый элемент системы может подвергаться воздействию как одной, так и нескольких

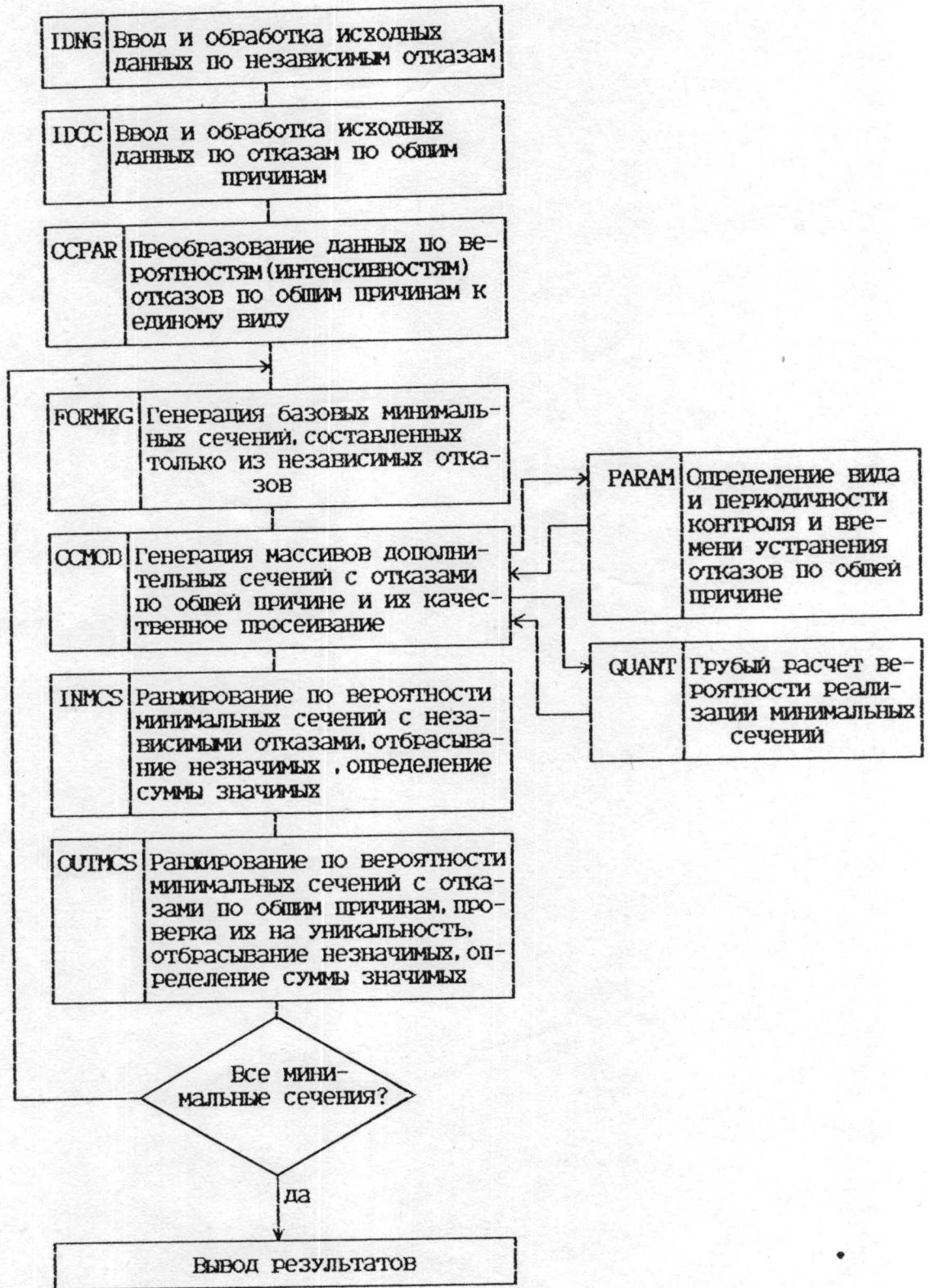


Рис. 2. 12. Блок-схема программы SOSAFAN.

- 100 -

общих причин, различных по моменту возникновения, степени влияния на работоспособность системы, возможности и периодичности выявления отказов, которые являются следствием этих причин.

В программе СОСАFAN предусмотрено моделирование трех классов общих причин. Это рассмотренные в разделе 2.5 общие причины, которые связаны с общностью конструкции элементов, общностью их расположения, общностью совершаемых над ними эксплуатационных процедур. В свою очередь, последние два класса общих причин могут разбиваться при моделировании на различные по характеру подклассы. Универсальность программы СОСАFAN позволяет моделировать и любые другие классы общих причин путем задания групп элементов, им подверженных, и параметров любой имеющейся в программе модели: $\mathcal{L}$ -фактора, β -фактора, греческих букв, базового параметра, биномиальной. В то же время в случае отсутствия у пользователя детальной исходной информации по перечисленным выше классам общих причин возможно их совместное моделирование одной из параметрических моделей.

В основу программы СОСАFAN положен подход, который предусматривает последовательное расширение базовых минимальных сечений, составленных только из независимых отказов элементов. В качестве первичных событий в этих сечениях могут быть представлены и ошибки персонала. Набор базовых минимальных сечений должен характеризовать условие неработоспособности рассматриваемых систем (каналов и т. п.). Во второй версии программы (СОСАFAN2) такой набор формируется подпрограммой FORMKG (см. рис. 2.12) на основании анализа дерева отказов. Однако, указанный подход позволяет проводить процедуру анализа отказов по общей причине при использовании любой инженерной методологии логического анализа систем (дерева событий, дерева отказов, блок-диаграммы и т. п.), приводящие в конечном счете к формированию сечений.

Идентификацию базовых минимальных сечений, которые необходимо