

ОБ ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СЛОЖНЫХ ПО СТРУКТУРЕ СХЕМ С УЧЁТОМ ДВУХ ТИПОВ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ

Ковалёв А.П., Чаплыгин Д.В.

Донецкий национальный технический университет
chapligin@list.ru

In this article the technique of an estimation of reliability of complex structures with use of the COMPUTER is described. The example of an estimation of reliability of complex structure is given in view of two types of refusals.

Актуальность. К невосстанавливаемым в процессе эксплуатации системам будем относить такие системы, восстановление которых по каким-либо причинам невозможно непосредственно в рассматриваемый период времени [1]. Под сложной по структуре схемой в данном случае будем понимать такую систему, в состав которой входит хотя бы одна «мостиковая структура» [2].

Методика оценки надёжности невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в двух состояниях: работоспособное и отказавшее (отказ типа «обрыв цепи»), разработаны в полной мере [1,2].

В тех случаях, когда необходимо повысить надёжность проектируемой системы без изменения надёжности комплектующих её элементов, обычно вводят избыточные (резервные) элементы или группы элементов, либо вносят определённые изменения в схему, что позволяет оптимизировать её структуру.

Для системы, состоящей из элементов, которые могут находиться в трёх состояниях, введение избыточных элементов с тремя состояниями может не только не увеличить надёжность схемы, но даже значительно её снизить. Всё будет зависеть от соотношения между различными видами отказов, конфигураций схемы и числа резервных элементов.

Для большинства электротехнических элементов можно выделить предельные случаи возможных внезапных отказов, а именно: обрыв цепи и короткое замыкание. Например, в конденсаторе обрыв проводников, припаянных к обкладкам, уменьшает его ёмкость до нуля (отказ типа «обрыв цепи»), или при увеличении токов утечки больше допустимого значения, происходит пробой конденсатора (отказ типа «короткое замыкание»). Отказы диода можно также разделить на два типа: отказы в диоде, приводящие к обрыву цепи (отказ типа «обрыв цепи») и короткому замыканию в самом диоде (отказ типа «короткое замыкание») и т. д.

Для релейно-контактных элементов различного вида и бесконтактных реле обрыв и короткое замыкание являются не предельными, а единственными возможными видами неработоспособных состояний [3].

Элементы с тремя состояниями можно выделить и в других системах, например: пожарные водопроводы, воздухоподающие трубопроводы, газопроводы, системы охлаждения атомных реакторов и т. д.

Аналогом элементов с тремя состояниями в таких системах могут быть: краны, вентили различных типов, запорная арматура, заглушки и другие прерыватели потока, для которых в неработоспособном состоянии поток не прерывается («короткое замыкание»), или не передаётся («обрыв цепи»).

Расчёт надёжности сложных по структуре схем с учётом двух типов отказов позволяет в значительной степени повысить точность расчётов и объяснить механизм и причины появления в исследуемой схеме множественных отказов.

Под множественным отказом понимается выход из строя нескольких элементов по одной и той же причине [4].

Постановка задачи. Дана сложная по структуре схема. Все элементы, которые входят в схему, могут отказывать в процессе эксплуатации независимо друг от друга. Элементы, из которых состоит схема, могут находиться в трёх состояниях: работоспособном и неработоспособном – отказ типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание». Эти события несовместны. Поток отказов типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» ординарные, стационарные и без последствия (простейшие). Пропускная способность элементов неограниченна. Вероятность безотказной работы i -го элемента схемы обозначим через p_i . Обозначим через q_{oi} – вероятность появления отказа в i -м элементе типа «обрыв цепи», а через q_{si} – вероятность появления отказов в i -м элементе типа «короткое замыкание». Эти три состояния составляют полную группу несовместных событий ($p_i + q_{si} + q_{oi} = 1$). Определить вероятность безотказной работы схемы R .

Пути решения поставленной задачи. Поставленную задачу можно решить с использованием понятий многозначной логики или понятий алгебры кортежей [5]. Однако, моделирование на ЭВМ сложных по структуре схем с учётом двух типов отказов с использованием многозначной логики приводит к определённым трудностям при переходе от логической функции работоспособности системы к вероятностной.

Поставленную задачу можно решить приближённым методом с использованием преобразования «треугольник-звезда», «звезда-треугольник» [6,7].

Обозначим работоспособное состояние элементов в структурно-сложной схеме символом $x_{k,i}$, а отказавшее $\bar{x}_{k,i}$, где через k обозначается код вида отказа, который принимает два значения. В том случае, когда $k=0$, то элемент подвергнут отказу типа «обрыв цепи», в том случае, если $k=s$, то элемент выходит из строя из-за отказа типа «короткое замыкание».

Предположим, что элементы сложной структуры подвержены только отказам типа «обрыв цепи».

Рассмотрим метод, основанный на использовании теоремы о сумме вероятностей несовместных событий [8]. В сложной по структуре схеме выбирают базовый элемент (или группу базовых элементов), обычно им является элемент (или группа элементов), входящие в параллельные ветви. Для такого элемента (или для группы) делаются следующие допущения:

- а) базовый элемент находится в работоспособном состоянии и абсолютно надежный;
- б) базовый элемент находится в отказавшем состоянии.

Для этих случаев, представляющих собой два несовместных события, исходная структурная схема преобразуется в две новые. В первой схеме вместо базового элемента становится абсолютно надежная линия. Во второй схеме вместо базового элемента рисуется обрыв цепи. В том случае, если в полученных двух схемах в параллельных ветвях нет повторяющихся элементов, и они состоят только из «смешанного» соединения элементов, то используют формулы для последовательного и параллельного соединения элементов [9], по которым вычисляются эквивалентные вероятности их безотказной работы R_{0j} , где $j=1,2$.

Вероятность безотказной работы схемы, состоящей из n логически последовательно соединённых элементов [6]

$$R_{0j} = \prod_{i=1}^n P_{oi}, \quad (1)$$

где n – число элементов в схеме;

P_{oi} – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из m параллельно соединённых элементов

$$R_{0j} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{oi}), \quad (2)$$

где m – число логически параллельно соединённых элементов в схеме.

Полученную вероятность безотказной работы R_{o1} и R_{o2} для получения двух схем умножают: первую на вероятность безотказного состояния базового элемента P_{oi} , а вторую на вероятность отказов Q_{oi} базового элемента. Сумма полученных двух слагаемых равна вероятности безотказной работы сложной схемы (R_0).

Если разложение сложной схемы ведётся не по одному элементу, а по целой группе, например, состоящей из двух элементов x_{oi} и x_{oj} $i \neq j$. Тогда схема преобразуется в четыре новые.

В первой схеме выносятся элементы \bar{x}_{oi} и \bar{x}_{oj} и на их местах ставятся разрывы цепи. Во второй схеме выносятся элементы x_{oi} и \bar{x}_{oj} . На том месте в схеме, где стоял элемент x_{oi} ставится абсолютно надёжная линия, а вместо второго элемента \bar{x}_{oj} ставится разрыв цепи. В третьей схеме выносятся элементы \bar{x}_{oi} и x_{oj} . На том месте в схеме, где был элемент \bar{x}_{oi} ставится разрыв цепи, а вместо элемента x_{oj} абсолютно надёжная линия. В четвёртой схеме выносятся элементы x_{oi} и x_{oj} , а на их местах ставятся абсолютно надёжные линии.

Вероятности безотказной работы каждой из четырёх полученных схем вычисляются с помощью формул (1) и (2) и умножаются: первая на вероятность $(1 - P_{oi})(1 - P_{oj})$, вторая на $P_{oi}(1 - P_{oj})$, третья на $(1 - P_{oi})P_{oj}$ и четвёртая на $P_{oi}P_{oj}$.

Полученные выражения по всем четырём схемам складываются, и определяется искомая вероятность безотказной работы схемы – R_0 .

Аналогичным образом поступают, если в качестве базового элемента выбирается группа из трёх, четырёх и т. д. элементов.

При вынесении базового элемента или группы базовых элементов в оставшейся схеме могут быть ветви, которые преобразуются в эквивалентные (рис. 1).

Используя приведенный алгоритм и схемы, изображённые на рис. 1, формулы (1) и (2) можно определить вероятность безотказной работы любой сложной по структуре схемы.

В том случае, если элемент кроме отказов типа «обрыв цепи» подвергается ещё и отказам типа «короткое замыкание», то зная функцию вероятности безотказной работы R_{0j} , полученную в предположении, что элементы схемы подвержены отказам типа «обрыв цепи», функцию вероятности безотказной работы R_{si} (учитывающую отказы типа «короткое замыкание»), находим с помощью следующего правила [8].

В полученной функции R_{oj} вероятности P_{oi} заменяем на Q_{si} ; $R_{oj}=1-Q_{oj}$ заменяем на Q_{sj} , Q_{oi} заменяется на P_{si} . Вероятность безотказной работы схемы с учётом двух видов отказов определяется по следующей формуле [6]:

$$R = 1 - Q_{oj} - Q_{sj} \quad (3)$$

Где Q_{oj} – вероятность отказов схемы при учёте отказов типа «обрыв цепи»;

Q_{sj} – вероятность отказов схемы при учёте отказов типа «короткое замыкание».

Используя описанную выше методику, представляется возможность оценивать надёжность любой сложной схемы с учётом двух типов отказов элементов схемы: отказ типа «обрыв цепи» и отказ типа «короткое замыкание».

ПРИМЕР 1. Дана мостиковая схема рис. 2. Исходные данные надёжности элементов схемы приведены в таблице 1. Необходимо определить вероятность безотказной работы схемы R .

Таблица 1 – Вероятности отказов элементов мостиковой структуры

| Элемент | Q_{oi} | P_{oi} | Q_{si} | P_{si} |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| X1 | 0,23 | 0,77 | 0,21 | 0,79 |
| X2 | 0,28 | 0,72 | 0,26 | 0,74 |
| X3 | 0,34 | 0,66 | 0,15 | 0,85 |
| X4 | 0,18 | 0,82 | 0,19 | 0,81 |
| X5 | 0,13 | 0,87 | 0,22 | 0,78 |

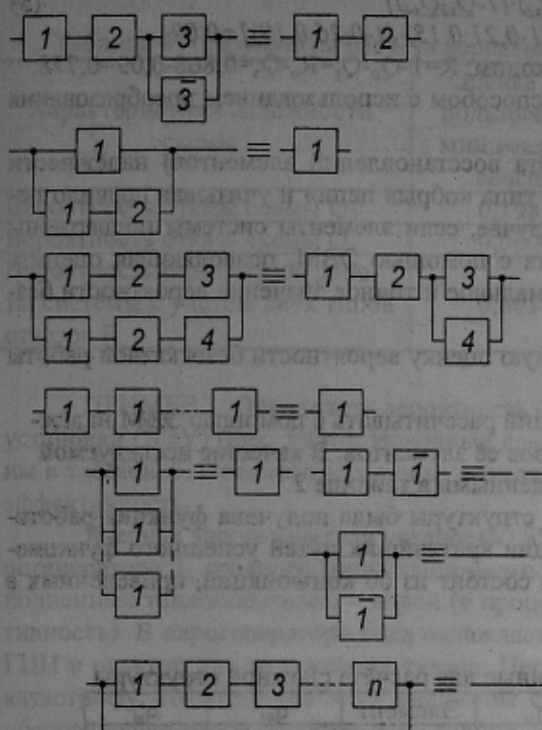


Рисунок 1 – Способы элементарного преобразования ветвей схемы

Решение

1. В качестве базового элемента выбираем элемент X_5 .
2. Делаем допущения о том, что базовый элемент X_5 абсолютно надёжный. В том месте в схеме, где находится элемент X_5 , ставится абсолютно надёжная линия. Последовательно с полученной схемой присоединяем к ней базовый элемент X_5 , вероятность безотказной работы которого будет равна P_{o5} (рис.

3а).

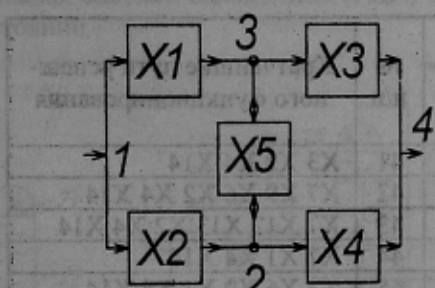


Рисунок 2 – Расчётная схема

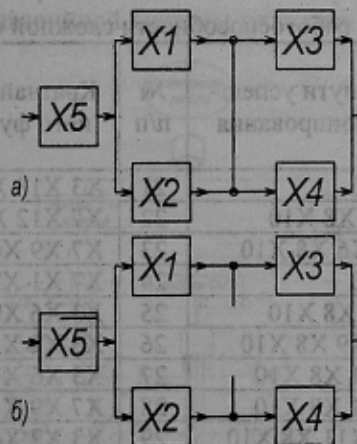


Рисунок 3 – Разложение мостиковой структуры по базовому элементу «5»

3. Делаем допущение о том, что базовый элемент X_5 абсолютно ненадёжен. В том месте схемы, где находится элемент X_5 , делаем разрыв цепи. Присоединяем к полученной структуре базовый элемент \bar{X}_5 с характеристикой его надёжности $(1-P_{o5})$, или Q_{o5} (рис. 3б).
4. Вероятность безотказной работы схемы R_o при учёте отказов элементов типа «обрыв цепи» равна сумме вероятностей безотказной работы схем, изображённых на рис. 3а,б. Используя формулы (1), (2) и данные таблицы 1, находим:

$$R_o = P_{o5} [1 - (1 - P_{o1}) \cdot (1 - P_{o2})] \cdot [1 - (1 - P_{o3}) \cdot (1 - P_{o4})] + Q_{o5} [1 - (1 - P_{o1} \cdot P_{o3}) \cdot (1 - P_{o2} \cdot P_{o4})] \quad (4)$$

$$R_o = 0,87 \cdot [1 - (1 - 0,77) \cdot (1 - 0,72)] \cdot [1 - (1 - 0,66) \cdot (1 - 0,82)] + 0,13 \cdot [1 - (1 - 0,77 \cdot 0,66) \cdot (1 - 0,72 \cdot 0,82)] = 0,764 + 0,104 = 0,868.$$

5. От функции R_o переходим к функции Q_s следующим образом: P_{oi} заменяем на Q_{si} , Q_{oi} на P_{si} , R_o на $1 - Q_s$.
 $Q_s = Q_{s1} \cdot [1 - (1 - Q_{s1}) \cdot (1 - Q_{s2})] \cdot [1 - (1 - Q_{s3}) \cdot (1 - Q_{s4})] + P_{s1} \cdot [1 - (1 - Q_{s1} \cdot Q_{s3}) \cdot (1 - Q_{s2} \cdot Q_{s4})]$ (5)
 $Q_s = 0,22 \cdot [1 - (1 - 0,21) \cdot (1 - 0,26)] \cdot [1 - (1 - 0,15) \cdot (1 - 0,19)] + 0,78 \cdot [1 - (1 - 0,21 \cdot 0,15) \cdot (1 - 0,26 \cdot 0,19)] = 0,09.$
6. Подставляя найденные значения R_o и Q_s в формулу (3), находим: $R = 1 - Q_o - Q_s = R_o - Q_s = 0,868 - 0,09 = 0,778.$
7. Аналогичный результат был получен, но более сложным способом с использованием преобразования «треугольник-звезда» [6].

Проанализировав существующие методы расчётов (без учёта восстановлений элементов) надёжности структурно-сложных схем, в которых учитывается отказ элементов типа «обрыв цепи» и учитывая правило перехода в [8] для получения функции безотказной работы, в том случае, если элементы системы подвержены отказам типа «короткое замыкание», разработана методика расчёта с помощью ЭВМ, позволяющая оценить надёжность любой сложной схемы и получать минимальное, максимальное и точное значение вероятности безотказной работы схемы.

ПРИМЕР 2. Определить минимальную, максимальную и точную оценку вероятности безотказной работы схемы. Вероятности отказов q_{oi} и q_{si} $i=1..16$ приведены в таблице 2.

Для выше описанного метода составлен алгоритм, позволяющий рассчитывать с помощью ЭВМ надёжность любой сложной по структуре схемы с учётом двух типов отказов её элементов. В качестве исследуемой структуры выбрана структура (рис. 4) с исходными данными, приведенными в таблице 2.

С помощью разработанной программы для заданной сложной структуры была получена функция работоспособности в виде дизъюнкции кратчайших путей успешного функционирования системы. Функция состоит из 60 конъюнкций, приведенных в таблице 3.

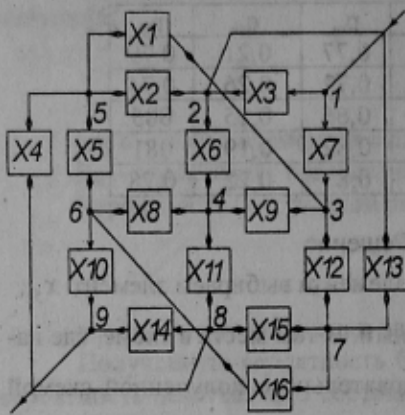


Рисунок 4 – Сложная структура

Таблица 2 – Исходные данные для расчёта сложной структуры

| Элемент | q_{oi} | q_{si} | Элемент | q_{oi} | q_{si} |
|----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| X ₁ | 0,34624 | 0,17665 | X ₉ | 0,21013 | 0,3222 |
| X ₂ | 0,25271 | 0,33251 | X ₁₀ | 0,32653 | 0,23542 |
| X ₃ | 0,28758 | 0,22176 | X ₁₁ | 0,21265 | 0,28957 |
| X ₄ | 0,31227 | 0,24818 | X ₁₂ | 0,14587 | 0,19545 |
| X ₅ | 0,35053 | 0,18087 | X ₁₃ | 0,28974 | 0,39856 |
| X ₆ | 0,31203 | 0,26226 | X ₁₄ | 0,32658 | 0,18975 |
| X ₇ | 0,26263 | 0,33485 | X ₁₅ | 0,36852 | 0,23654 |
| X ₈ | 0,28514 | 0,22811 | X ₁₆ | 0,12987 | 0,35124 |

Таблица 3 – Функция работоспособности сложной структуры

| № п/п | Кратчайшие пути успешного функционирования | № п/п | Кратчайшие пути успешного функционирования | № п/п | Кратчайшие пути успешного функционирования |
|-------|--|-------|--|-------|--|
| 1 | X3 X6 X8 X10 | 21 | X3 X13 X16 X10 | 41 | X3 X2 X4 X14 |
| 2 | X7 X1 X2 X6 X8 X10 | 22 | X7 X12 X16 X10 | 42 | X7 X9 X6 X2 X4 X14 |
| 3 | X7 X12 X13 X6 X8 X10 | 23 | X7 X9 X6 X13 X16 X10 | 43 | X7 X12 X13 X2 X4 X14 |
| 4 | X7 X9 X8 X10 | 24 | X7 X1 X2 X13 X16 X10 | 44 | X7 X1 X4 X14 |
| 5 | X3 X2 X1 X9 X8 X10 | 25 | X3 X6 X9 X12 X16 X10 | 45 | X3 X6 X9 X1 X4 X14 |
| 6 | X3 X13 X12 X9 X8 X10 | 26 | X3 X2 X1 X12 X16 X10 | 46 | X3 X13 X12 X1 X4 X14 |
| 7 | X3 X2 X4 X11 X8 X10 | 27 | X3 X6 X11 X15 X16 X10 | 47 | X3 X6 X8 X5 X4 X14 |
| 8 | X7 X1 X4 X11 X8 X10 | 28 | X7 X9 X11 X15 X16 X10 | 48 | X7 X9 X8 X5 X4 X14 |
| 9 | X3 X13 X15 X11 X8 X10 | 29 | X3 X2 X4 X15 X16 X10 | 49 | X3 X13 X16 X5 X4 X14 |
| 10 | X7 X12 X15 X11 X8 X10 | 30 | X7 X1 X4 X15 X16 X10 | 50 | X7 X12 X16 X5 X4 X14 |
| 11 | X3 X2 X5 X10 | 31 | X3 X6 X11 X14 | 51 | X3 X13 X15 X14 |
| 12 | X7 X9 X6 X2 X5 X10 | 32 | X7 X1 X2 X6 X11 X14 | 52 | X7 X9 X6 X13 X15 X14 |
| 13 | X7 X12 X13 X2 X5 X10 | 33 | X7 X12 X13 X6 X11 X14 | 53 | X7 X1 X2 X13 X15 X14 |
| 14 | X7 X1 X5 X10 | 34 | X7 X9 X11 X14 | 54 | X7 X12 X15 X14 |
| 15 | X3 X6 X9 X1 X5 X10 | 35 | X3 X2 X1 X9 X11 X14 | 55 | X3 X6 X9 X12 X15 X14 |
| 16 | X3 X13 X12 X1 X5 X10 | 36 | X3 X13 X12 X9 X11 X14 | 56 | X3 X2 X1 X12 X15 X14 |
| 17 | X3 X6 X11 X4 X5 X10 | 37 | X3 X2 X5 X8 X11 X14 | 57 | X3 X6 X8 X16 X15 X14 |
| 18 | X7 X9 X11 X4 X5 X10 | 38 | X7 X1 X5 X8 X11 X14 | 58 | X7 X9 X8 X16 X15 X14 |
| 19 | X3 X13 X15 X4 X5 X10 | 39 | X3 X13 X16 X8 X11 X14 | 59 | X3 X2 X5 X16 X15 X14 |
| 20 | X7 X12 X15 X4 X5 X10 | 40 | X7 X12 X16 X8 X11 X14 | 60 | X7 X1 X5 X16 X15 X14 |

Используя схемы минимальных сечений, была определена минимальная оценка R_{min} , $Q_{отв}$, $Q_{мин}$. Пользуясь схемой кратчайших путей успешного функционирования, была получена максимальная оценка R_{max} , $Q_{отв}$, Q_{max} а также точная оценка R , $Q_{от}$, $Q_{т}$. Результаты расчётов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта вероятностных характеристик

| Характеристики надёжности схемы | Оценка с использованием минимальных сечений | Точное значение вероятности безотказной работы схемы | Оценка надёжности схемы с использованием схемы замещения кратчайших путей успешного функционирования |
|--|---|--|--|
| Вероятность отказа схемы Q_0 | 0,19806 | 0,19115 | 0,00002 |
| Вероятность отказа схемы Q_s | 0,00006 | 0,04688 | 0,06179 |
| Вероятность безотказной работы системы с учётом двух типов отказов R | 0,80188 | 0,76197 | 0,93819 |

ПРИМЕР 3. Определить вероятность безотказной работы R системы охлаждения ядерной энергетической установки (ЯЭУ) (рис. 5)[10]. Исходные данные вероятностей безотказной работы элементов системы приведены в таблице 5. Предложить один из возможных вариантов резервирования системы охлаждения и оценить его эффективность.

Ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) включает первый контур (рис. 5), состоящий из реактора 0, парогенератора 1, главного циркуляционного насоса (ГЦН) 2 и главных циркуляционных трубопроводов 3, заполненных теплоносителем – водой (в процессе работы реактора вода получает высокую наведенную радиоактивность). В парогенераторе вода охлаждается и, отдав теплоту теплоносителю второго контура, возвращается ГЦН в реактор для охлаждения ТВЭЛов. Перегрев оболочек ТВЭЛов и их разрушение можно рассматривать как катастрофу. Поэтому все ЯЭУ снабжены системами аварийного охлаждения зоны реактора САОЗ, которые обеспечивают отвод теплоты из активной зоны в случае разгерметизации циркуляционного контура и потери теплоносителя. САОЗ включает насосы низкого давления (ННД) 16 и 17 и высокого давления (НВД) 8 и 9, гидроаккумулятор (ГА) 22, в котором вода находится под давлением азота 23, и баки запаса воды и раствора борной кислоты 12 и 15. Условно примем следующий порядок работы САОЗ при большой разгерметизации циркуляционного контура: сначала работает САОЗ высокого давления (ВД), состоящая из НВД и необходимой арматуры, затем работает САОЗ низкого давления (НД) – ГА и ННД. В процессе эксплуатации ЯЭУ при возникновении «малых» течей допускается временная работа без аварийной остановки; при этом происходит автоматическая компенсация теплоносителя (работают компенсаторы, барботер) или принимаются другие срочные меры к локализации течи и устранению загрязнений помещения радиоактивностью. В нормальном режиме работает основная система охлаждения (ГЦН) и все переключки аварийной системы охлаждения находятся в закрытом состоянии.

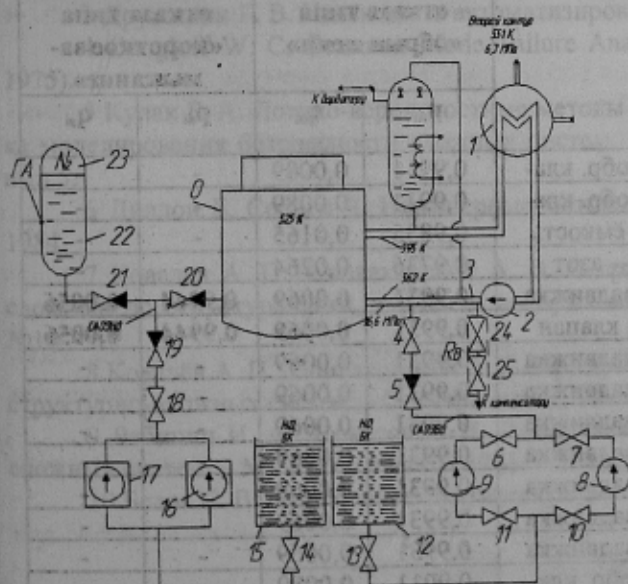


Рисунок 5 – схема ядерной энергетической установки до резервирования

Дерево для оценки вероятности безотказной работы системы охлаждения ЯЭУ приведено на рис. 6

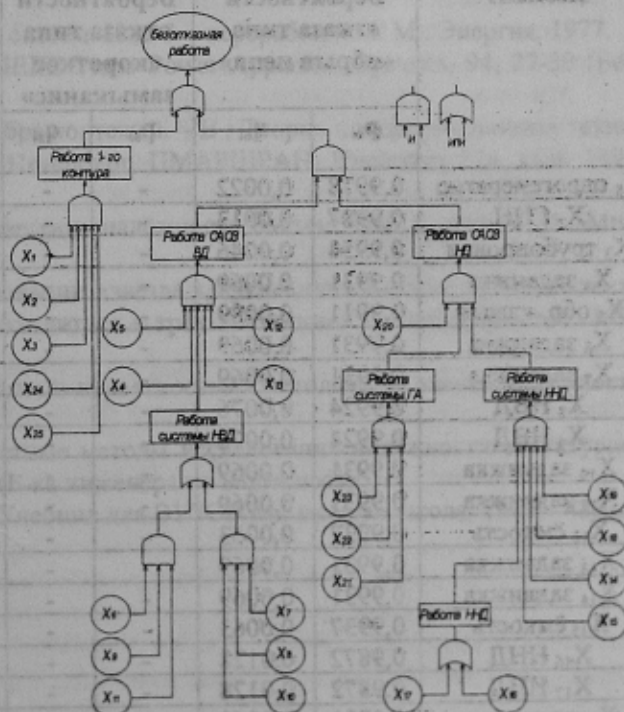


Рисунок 6 – логическая схема работоспособности системы охлаждения ядерной энергетической установки до резервирования

Таблица 5 – Вероятности безотказной работы элементов ЯЭУ (до резервирования)

| Элемент | Вероятности отказа типа «обрыв цепи» | | Вероятности отказа типа «короткое замыкание» | |
|----------------------------|--------------------------------------|-----------------|--|-----------------|
| | P _{oi} | Q _{oi} | P _{si} | Q _{si} |
| X ₁ парогенера- | 0,9978 | 0,0022 | - | - |
| X ₂ ГЦН | 0,9987 | 0,0013 | - | - |
| X ₃ трубопро- | 0,9954 | 0,0046 | - | - |
| X ₄ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₅ обр. клапан | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₆ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₇ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₈ НВД | 0,9924 | 0,0076 | - | - |
| X ₉ НВД | 0,9924 | 0,0076 | - | - |
| X ₁₀ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₁ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₂ ёмкость | 0,9937 | 0,0063 | - | - |

| Элемент | Вероятности отказа типа «обрыв цепи» | | Вероятности отказа типа «короткое замыкание» | |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------|--|-----------------|
| | P _{oi} | Q _{oi} | P _{si} | Q _{si} |
| X ₁₃ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₄ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₅ ёмкость | 0,9937 | 0,0063 | - | - |
| X ₁₆ ННД | 0,9872 | 0,0128 | - | - |
| X ₁₇ ННД | 0,9872 | 0,0128 | - | - |
| X ₁₈ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₉ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₂₀ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₂₁ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₂₂ ёмкость | 0,9835 | 0,0165 | - | - |
| X ₂₃ азот | 0,9736 | 0,0264 | - | - |
| X ₂₄ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | 0,9944 | 0,0056 |
| X ₂₅ клапан | 0,9931 | 0,0069 | 0,9944 | 0,0056 |

Исходя из приведенной схемы, логическая функция работоспособности системы запишется в виде:

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_{23}) = [x_{14}x_{15}(x_{16} \cup x_{17})x_{18}x_{19}]/[x_{21}x_{22}x_{23}]/[x_{20}]/[(x_6x_9x_{11} \cup x_7x_8x_{10})x_4x_5x_{12}x_{13}] \cup [x_1x_2x_3x_{24}x_{25}];$$

Функция является бесповторной, что позволяет сразу перейти к вероятностной характеристике системы:

$$R = 1 - [1 - [P_{014} \cdot P_{015} \cdot (1 - Q_{016} \cdot Q_{017}) \cdot P_{018} \cdot P_{019} \cdot P_{021} \cdot P_{022} \cdot P_{023} \cdot P_{020} \cdot [1 - (1 - P_{06} \cdot P_{09} \cdot P_{011}) \cdot (1 - P_{07} \cdot P_{08} \cdot P_{010})] \cdot P_{04} \cdot P_{05} \cdot P_{012} \cdot P_{013}]] \cdot [1 - P_{01} \cdot P_{02} \cdot P_{03} \cdot R_B]. \quad (6)$$

где $R_B = P_{024} \cdot P_{025} \cdot (1 - P_{s24}) \cdot (1 - P_{s25})$ – вероятность безотказной работы предохранительного клапана и перемычки с учётом отказов типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание».

Подставляя в (6) вероятности отдельных элементов, получим $R = 0,9975382$.

На рисунке 7 приведена схема ЯЭУ, в которой выполнено резервирование перемычек и обратных клапанов.

Таблица 6 – Вероятности безотказной работы элементов ЯЭУ (после резервирования)

| Элемент | Вероятности отказа типа «обрыв цепи» | | Вероятности отказа типа «короткое замыкание» | | Элемент | Вероятности отказа типа «обрыв цепи» | | Вероятности отказа типа «короткое замыкание» | |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------|--|-----------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------|--|-----------------|
| | P _{oi} | Q _{oi} | P _{si} | Q _{si} | | P _{oi} | Q _{oi} | P _{si} | Q _{si} |
| X ₁ парогенератор | 0,9978 | 0,0022 | - | - | X ₂₀ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₂ ГЦН | 0,9987 | 0,0013 | - | - | X ₂₁ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₃ трубопровод | 0,9954 | 0,0046 | - | - | X ₂₂ ёмкость | 0,9835 | 0,0165 | - | - |
| X ₄ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₂₃ азот | 0,9736 | 0,0264 | - | - |
| X ₅ обр. клапан | 0,9911 | 0,0089 | - | - | X ₂₄ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | 0,9944 | 0,0056 |
| X ₆ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₂₅ клапан | 0,9931 | 0,0069 | 0,9944 | 0,0056 |
| X ₇ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₂₆ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₈ НВД | 0,9924 | 0,0076 | - | - | X ₂₇ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₉ НВД | 0,9924 | 0,0076 | - | - | X ₂₈ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₀ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₂₉ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₁ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₃₀ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₂ ёмкость | 0,9937 | 0,0063 | - | - | X ₃₁ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₃ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₃₂ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₄ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₃₃ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₁₅ ёмкость | 0,9937 | 0,0063 | - | - | X ₃₄ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₁₆ ННД | 0,9872 | 0,0128 | - | - | X ₃₅ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - |
| X ₁₇ ННД | 0,9872 | 0,0128 | - | - | X ₃₆ обр. кла- | 0,9911 | 0,0089 | - | - |
| X ₁₈ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | - | - | X ₃₇ задвижка | 0,9931 | 0,0069 | 0,9944 | 0,0056 |
| X ₁₉ обр. клапан | 0,9911 | 0,0089 | - | - | X ₃₈ клапан | 0,9931 | 0,0069 | 0,9944 | 0,0056 |

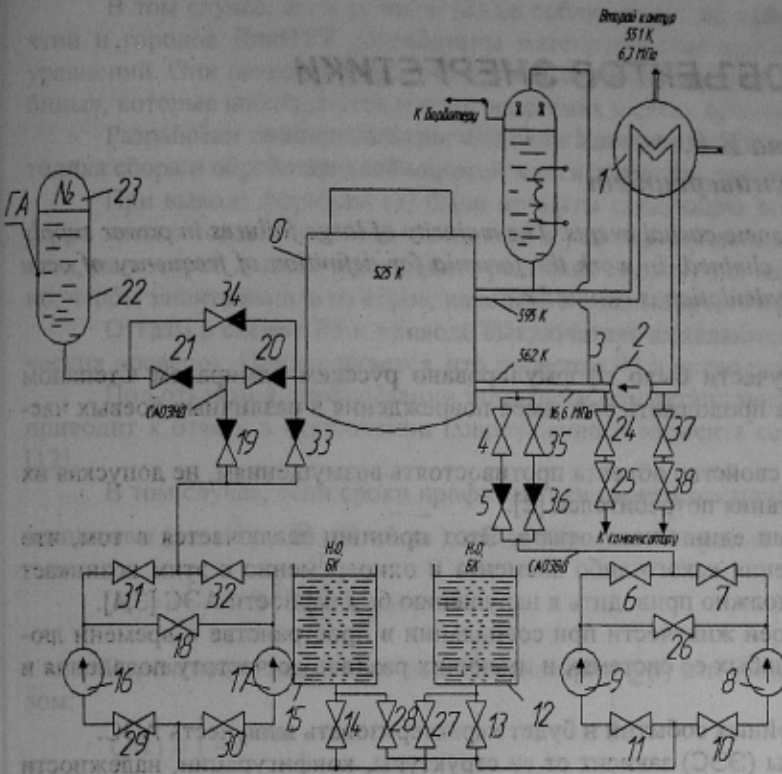


Рисунок 7 - схема ядерной энергетической установки после резервирования

Логическая функция работоспособности системы запишется в виде:

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_{23}) = [(x_{15}x_{14} \cup x_{12}x_{27})(x_{15}x_{28} \cup x_{12}x_{13})(x_{29}x_{16}x_{31} \cup x_{29}x_{16}x_{18}x_{32} \cup x_{30}x_{17}x_{32} \cup x_{30}x_{17}x_{18}x_{31})(x_{33} \cup x_{19}x_{20})(x_{34} \cup x_{21}x_{20})x_{22}x_{23}(x_{11}x_9x_6 \cup x_{11}x_9x_{26}x_7 \cup x_{10}x_8x_7 \cup x_{10}x_8x_{26}x_6)(x_5x_4 \cup x_{35}x_{36})] \cup [x_1x_2x_3(x_{24}x_{25} \cup x_{37}x_{38})]$$

Функция не является неповторной, поэтому для перехода к вероятностной характеристике необходимо выполнить разрезание по повторяющимся элементам. Методика алгоритма разрезания описана выше. Выполнив переход к вероятностной характеристике, и подставив исходные данные элементов после резервирования (таблица 6), получим $R^* = 0,9996338$.

Рассчитаем коэффициент эффективности предложенного варианта резервирования:

$$K_3 = \frac{(1-R)n}{(1-R^*)n^*} = \frac{(1-0,9975382)25}{(1-0,9996338)38} = 4,423,$$

где n и n^* – количество элементов в схеме до и после резервирования соответственно.

Следовательно, для повышения надёжности системы охлаждения в предложенном варианте было использовано 8 задвижек, 3 обратных клапана и 2 предохранительных клапана, что позволило увеличить эффективность системы охлаждения в 4,4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Козлов Б. А., Ушаков Н. А. Справочник по расчёту надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. - М.: Советское радио, 1975.
- 2 Рябинин И. А. Основы теории и расчёта надёжности судовых электроэнергетических систем. 2-е изд. - Л.: Судостроение, 1971.
- 3 Дружинин Ф. В. Надёжность автоматизированных систем. Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Энергия, 1977.
- 4 Gangloff W. C. Common Mode Tailure Analysis, IEEE Trans Power Apparatus Systems, 94, 27-30 (Feb. 1975);
- 5 Кулак Б. А. Логико-вероятностные методы и алгебра кортежей. - В : Теория и информационная техника моделирования безопасности сложных систем. Санкт-Петербург. ПМАРШРАН, Преприпт 124, вып. 1995, вып 5.
- 6 Диллон Б, Селигх Ч. Инженерные методы обеспечения надёжности систем: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984.
- 7 Ковалёв А. П., Спиваковский А. В. О преобразовании «звезда-треугольник» в расчётах надёжности сложных по структуре схем, элементы которых могут находиться в трёх состояниях. - Электричество, 1998 №10
- 8 Ковалёв А. П., Спиваковский А. В. Применение логико-вероятностных методов для оценки надёжности структурно-сложных систем. - Электричество, 2000 №9.
- 9 Рябинин И. А. Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно-сложных систем. - М.: Радио и связь, 1981. - 264 с., ил. - (Б-ка инженера по надёжности).
- 10 Белов С. В. Безопасность жизнедеятельности. - Учебник для ВУЗОВ М.: высшая школа, 1999 - 488 с.