

СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА СОСТОЯНИЙ И МЕТОДА СВЕРТКИ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ РЕЗЕРВИРУЕМОГО УЗЛА СО СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Зацепина М.И., Силенкова Д.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Боровиков С.М. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Эталонное значение получено методом полного перебора 81 возможной комбинации состояний элементов с учетом отказов по типу обрыва и короткого замыкания. Результат сопоставлен с расчетом, выполненным методом свертки по правилам последовательного и параллельного соединения. Совпадение полученных значений вероятности безотказной работы подтверждает практическую применимость метода свертки при анализе резервируемых узлов.

Ключевые слова: надежность, резервирование, смешанное соединение, обрыв, короткое замыкание, модель с тремя состояниями, метод свертки, полный перебор состояний.

Введение. При анализе надёжности резервируемых электронных узлов существенное влияние на результат оказывают структура соединения элементов и характер их отказов. Для элементов, у которых вероятности отказов по типу обрыва и короткого замыкания сопоставимы, широко применяются смешанные последовательно-параллельные схемы. Для таких структур применяются различные методы расчета вероятности безотказной работы, отличающиеся вычислительной сложностью. В настоящей работе выполняется сравнение метода полного перебора состояний и метода свертки на примере двух схем резервируемого узла с одинаковыми исходными параметрами.

Основная часть. Рассматривается резервируемый узел, состоящий из четырёх одинаковых элементов, соединенных по смешанной последовательно-параллельной схеме. Электрические схемы исследуемых вариантов приведены на рисунке 1.

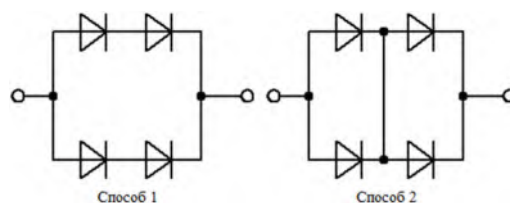


Рисунок 1 – Схемы резервируемого узла: способ 1 – последовательно-параллельная схема; способ 2 – параллельно-последовательная схема.

Каждый элемент узла описывается моделью с тремя возможными состояниями: работоспособное состояние, отказ по типу обрыва и отказ по типу короткого замыкания. Для заданного момента времени вероятности состояний элемента удовлетворяют условию нормировки, которое определяется по формуле 1.

$$p + q_o + q_{кз} = 1 \quad (1)$$

где p – вероятность работоспособного состояния элемента;

q_o – вероятность отказа по типу обрыва;

$q_{кз}$ – вероятность отказа по типу короткого замыкания.

В работе используются значения p , q_o , $q_{кз}$ приведенные ниже в в таблице 1.

Таблица 1 – Вероятности состояний элемента

Обозначение	Значение
p	0,8
$q_{кз}$	0,1
q_o	0,1

В качестве эталонного подхода используется метод полного перебора состояний. Поскольку пространство состояний одного элемента содержит три состояния, для узла из четырех элементов общее число возможных состояний определяется следующим выражением:

$$N = 3^4 = 81. \quad (2)$$

Каждому состоянию узла соответствует комбинация состояний отдельных элементов $\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$. Вероятность i -го состояния определяется произведением вероятностей состояний элементов определяется по формуле:

$$P(i) = P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(s_3) \cdot P(s_4), \quad (3)$$

где $P(S_j)$ – вероятность состояния j -го элемента.

Суммарная вероятность безотказной работы узла определяется выражением:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i \in \Omega_{\text{раб}}} P(i), \quad (4)$$

где $\Omega_{\text{раб}}$ – множество работоспособных состояний узла.

Для исключения ручного перечисления 81 комбинации перебор реализован в виде автоматизированной табличной модели на основе троичного представления номера состояния. Работоспособность состояния определяется логическим условием, соответствующим структуре схемы. По результатам расчетов получено значение $P_{\Sigma} = 0,944$, данное значение далее используется как эталонное.

В качестве альтернативы использует метод свертки до эквивалентного элемента, основанный на последовательной замене участков схемы эквивалентными элементами с сохранением вероятностных характеристик. Для двух последовательно соединенных элементов вероятность короткого замыкания эквивалентного элемента определяется выражением:

$$q_{кз,э} = q_{кз1} \cdot q_{кз2}, \quad (5)$$

где $q_{кз1}, q_{кз2}$ – вероятности короткого замыкания первого и второго элементов.

Вероятность отсутствия обрыва при последовательном соединении определяется по формуле:

$$1 - q_{o,э} = (p_1 + q_{кз1}) \cdot (p_2 + q_{кз2}), \quad (6)$$

откуда вероятность отказа по типу обрыва равна:

$$q_{o,э} = 1 - (p_1 + q_{кз1}) \cdot (p_2 + q_{кз2}), \quad (7)$$

Вероятность работоспособного состояния эквивалентного элемента определяется из условия нормировки по формуле (1). Для параллельного соединения вероятность отказа по типу обрыва эквивалентного элемента определяется выражением:

$$q_{o,\varepsilon} = q_{o1} \cdot q_{o2}, \quad (8)$$

Вероятность короткого замыкания эквивалентного элемента вычисляется по формуле:

$$q_{k3,\varepsilon} = 1 - (p_1 + q_{o1}) \cdot (p_2 + q_{o2}). \quad (9)$$

Применение указанных соотношений к рассматриваемым схемам со значениями $p = 0,8$; $q_o = 0,1$; $q_{k3} = 0,1$ приводит к одинаковому итоговому значению вероятности безотказной работы узла $P_{\Sigma} = 0,944$, что полностью совпадает с результатом метода полного перебора. Совпадение результатов объясняется тем, что на каждом этапе свертки сохраняется корректное вероятностное описание эквивалентного элемента, а итоговая величина определяется только структурой соединения и исходными вероятностями состояний.

Заклучение. Выполнено сравнение метода полного перебора состояний и метода свёртки при оценке вероятности безотказной работы резервируемого узла со смешанным соединением элементов. Оба подхода дают одинаковый численный результат. Полный перебор обеспечивает эталонную точность, но обладает экспоненциальной сложностью. Метод свёртки эквивалентен по результату и требует значительно меньших вычислительных затрат, поэтому предпочтителен для узлов большой размерности.

Список литературы

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/25651>. Дата доступа: 05.01.2026.
3. Надёжность в технике. Термины и определения: ГОСТ 27.002-2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293754/4293754027.pdf>. Дата доступа: 06.01.2026.
4. Надёжность в технике. Структурная схема надёжности: ГОСТ Р МЭК 61078-2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data/793/79355.pdf>. Дата доступа: 06.01.2026.

UDC 621.3.019.3

COMPARISON OF COMPLETE STATE ENUMERATION AND CONVOLUTION METHODS FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF A REDUNDANT NODE WITH MIXED INTERCONNECTION OF ELEMENTS

Zatsepina M.I., Silenkova D.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Borovikov S.M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. A reference value is obtained by complete enumeration of 81 possible combinations of element states accounting for open circuit and short circuit failures. The result is compared with a calculation performed using the convolution method based on series and parallel connection rules. The coincidence of the obtained reliability values confirms the applicability of the convolution method for the analysis of more complex redundant structures.

Keywords: reliability, redundancy, mixed interconnection, open circuit, short circuit, three state element model, convolution method, complete state enumeration.