

Раздел 4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РЭУ

СОДЕРЖАНИЕ

4.1. Понятие эксплуатационной надёжности РЭУ.....	76
4.2. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭУ.....	76
4.3. Общая характеристика резервирования.....	77
4.4. Характеристика постоянного резервирования.....	79
4.5. Оценка показателей безотказности устройства при наличии постоянного резервирования.....	80
4.6. Характеристика резервирования замещением.....	84
4.7. Анализ безотказности РЭУ при наличии резервирования замещением (нагруженный резерв).....	86

Раздел 4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РЭУ

4.1. Понятие эксплуатационной надёжности РЭУ

Надёжность РЭУ закладывается на этапе проектирования, должна обеспечиваться на этапе производства и поддерживаться на этапе эксплуатации.

Надёжность, которую РЭУ показывают в процессе эксплуатации, называют **эксплуатационной надёжностью**. Опыт эксплуатации РЭУ показывает, что эксплуатационная надёжность практически всегда ниже того уровня, который получается по результатам расчёта при проектировании устройства. Объясняется это как явными ошибками проектирования и несовершенством технологии производства, так и низкой достоверностью справочных данных о надёжности элементов.

Изложенные ранее методики оценки показателей надёжности РЭУ дают приемлемые для практики результаты в случае выполнения для элементов принципа статистической устойчивости показателей надёжности. Этот принцип означает, что для элементов данного типа, независимо от партий или времени их выпуска, должны сохраняться статистические значения показателей надёжности, а именно:

$$M(\lambda_i) = \text{const};$$

$$\sigma(\lambda_i) = \text{const},$$

где M, σ — знаки математического ожидания и среднего квадратического отклонения;

i — номер партии элемента данного типа.

В условиях относительно совершенных технологических процессов и высокой культуры производства этот принцип, как правило, выполняется.

4.2. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭУ

Все методы повышения надёжности РЭУ можно условно разбить на две группы методов: схмотехнические и конструкторско-технологические.

Основные методы первой группы:

1. Выбор электрических принципиальных схем, содержащих минимальное число элементов.

2. Выбор электрических принципиальных схем, выходные характеристики которых слабо зависят от изменения напряжения питания и разброса параметров элементов.

Это позволяет в значительной степени повысить параметрическую надёжность, т.е. свести к минимуму постепенные отказы.

3. Выбор электрических принципиальных схем, устойчивых к воздействию дестабилизирующих факторов, особенно температуры.

Среди методов второй группы необходимо отметить следующие:

1. Правильный выбор коэффициентов электрической нагрузки элементов. Замечено, что для большинства элементов оптимальные значения коэффициентов электрической нагрузки близки к числам 0,3...0,6. Их снижение повышает надёжность элементов, однако ведёт, как правило, к увеличению массы, габаритов, стоимости устройства. Кроме того, чрезмерное уменьшение коэффициентов электрической нагрузки может вызвать нестабильную работу ряда элементов, в частности полупроводниковых приборов.

2. Отбраковка потенциально ненадёжных элементов в условиях производства РЭУ. Используют как электротермотренировку, так и методы индивидуального прогнозирования надёжности элементов.

3. Защита элементов РЭУ от воздействия факторов окружающей среды.

Особую группу методов составляет повышение надёжности путём резервирования.

Подробное рассмотрение методов повышения надёжности РЭУ является предметом рассмотрения раздела 5.

При изучении методов повышения надёжности элементов и РЭУ читатель может также использовать работы [1, 3, 10, 11].

В данном разделе рассматривается резервирование, его виды и методы оценки показателей безотказности устройств при наличии резервирования.

4.3. Общая характеристика резервирования

Резервирование – это введение в структуру устройства дополнительного числа элементов, цепей и (или) функциональных связей по сравнению с минимально необходимыми для функционирования устройства. Цель резервирования – повышение надёжности устройства.

В зависимости от того, как подключаются резервные элементы в случае отказа основных, различают следующие виды резервирования:

- 1) постоянное;
- 2) замещением;
- 3) скользящее (может рассматриваться как частный случай резервирования замещением).

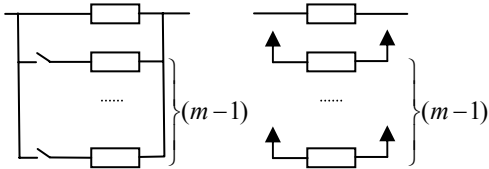


Рис.4.1. Схематическое изображение резервирования замещением:
 $(m-1)$ – количество резервных элементов

При постоянном резервировании резервные элементы постоянно подключены к основным и находятся в одинаковом с ними электрическом режиме. Деление элементов на основные и резервные носит здесь условный характер.

При резервировании замещением основной элемент в случае его отказа отключается от электрической схемы, обычно как по выходу, так и по входу,

и вместо него подключается один из резервных элементов.

Переключение может выполняться либо автоматически с помощью переключающих устройств, либо вручную. Условно резервирование замещением изображается одним из способов, указанных на рис.4.1.

Скользящее резервирование – это резервирование замещением, при котором любой резервный элемент может замещать любой основной элемент. Это возможно лишь при их однотипности.

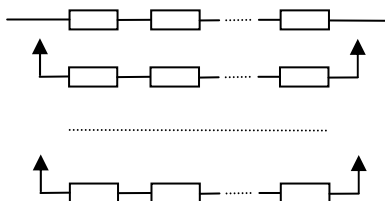


Рис.4.2. Общее резервирование

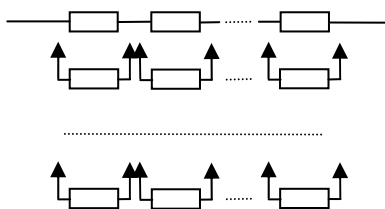


Рис.4.3. Раздельное (поэлементное) резервирование

При рассмотрении резервирования под словом "элемент" следует понимать как комплектующий элемент, так и каскад, функциональный узел, блок и т.д., имея в виду, что резервирование может выполняться на уровне различных частей РЭС.

В зависимости от того, какая часть РЭС резервируется, различают общее (рис.4.2) и раздельное (поэлементное) резервирование (рис.4.3).

При общем резервировании резервируется устройство в целом. При раздельном резервировании РЭУ резервируется по частям.

4.4. Характеристика постоянного резервирования

При постоянном резервировании деление элементов на основные и резервные носит условный характер. Различают следующие способы соединения элементов резервируемого узла:

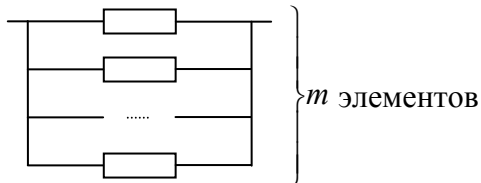


Рис.4.4. Параллельный способ соединения элементов резервируемого узла

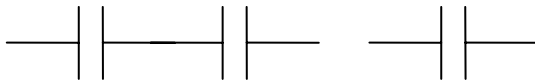


Рис.4.5. Последовательный способ соединения элементов резервируемого узла

1. Параллельный (рис.4.4).

Такой способ соединения используется в случае преобладания отказов типа "обрыв" (например, для резисторов).

2. Последовательный (рис.4.5).

Этот способ применяется тогда, когда преобладают отказы типа "короткое замыкание" (например, для конденсаторов).

3. Смешанный (рис.4.6).

Такой способ применяется тогда, когда отказы типа "обрыв"

и типа "короткое замыкание" примерно равновероятны, например, для полупроводниковых диодов.

На практике рассматриваемое постоянное резервирование используют тогда, когда между какими-то точками электрической схемы необходимо обеспечить наличие определенных свойств (резистивных, емкостных, проводящих, усилительных и т.д.), а количественное значение характеристики, описывающей эти свойства, не играет принципиальной роли.

Основными достоинствами постоянного резервирования являются: простота технической реализации и отсутствие даже кратковременного перерыва в работе в случае отказа элементов резервируемого узла. Это особенно важно для вычислительной техники и устройств цифровой обработки информации.

Основные недостатки постоянного резервирования:

1) меньший выигрыш в надёжности по сравнению с резервированием замещением;

2) изменение электрического режима работы элементов резервируемого узла при отказе хотя бы одного из элементов;

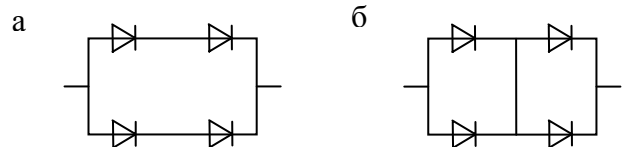


Рис.4.6. Примеры смешанного соединения элементов резервируемого узла:

а) - последовательно-параллельная схема;

б) - параллельно-последовательная схема

3) отказ резервируемого узла в целом при замыкании одного из элементов в случае параллельного способа соединения элементов в узле;

4) отказ резервируемого узла в целом при обрыве одного из элементов в случае последовательного соединения элементов в узле.

Рассматриваемое постоянное резервирование на практике обычно выполняется на уровне комплектующих элементов и каскадов.

4.5. Оценка показателей безотказности устройства при наличии постоянного резервирования

Анализ безотказности выполняют, основываясь на том, что для каждого элемента резервируемого узла справедливо выражение

$$p + q_o + q_{кз} = 1, \quad (4.1)$$

где p – вероятность безотказной работы;

q_o – вероятность отказа типа “обрыв”;

$q_{кз}$ – вероятность отказа типа “короткое замыкание”.

Предполагается, что вероятности p , q_o , $q_{кз}$, соответствующие элементу, подсчитываются для одного и того же заданного времени t_3 , т. е.

$$p = p(t_3); \quad q_o = q_o(t_3); \quad q_{кз} = q_{кз}(t_3).$$

Выражение (4.1) означает, что в любой момент времени элемент либо исправен, либо имеет отказ типа “обрыв”, или отказ типа “короткое замыкание”. Указанные три состояния являются несовместными и образуют полную группу событий.

Покажем приём анализа безотказности на примере параллельного способа соединения двух элементов резервируемого узла (рис.4.7).

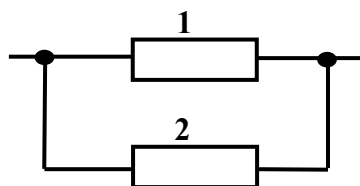


Рис.4.7. Параллельное соединение элементов

Будем предполагать, что элементы резервируемого узла идентичны и имеют характеристики p , q_o , $q_{кз}$.

Рассмотрим состояния, благоприятствующие безотказной работе этого резервируемого узла. Всего состояний резервируемого узла девять ($3^2=9$), так как элемент имеет три состояния, а всего элементов два (см. рис.4.7).

Из девяти состояний благоприятствующими безотказной работе узла в целом будут лишь три (табл.4.1).

Таблица 4.1

Состояния резервируемого узла,
благоприятствующие его безотказной работе

Номер состояния	Элемент 1	Элемент 2
1	p	p
2	p	q_o
3	q_o	p

В табл.4.1 знаком p обозначено исправное состояние элемента, знаком q_o – состояние, соответствующее отказу типа “обрыв”.

Так как указанные состояния являются несовместными, то вероятность безотказной работы резервируемого узла в целом может быть подсчитана как сумма вероятностей этих состояний, т.е.

$$P_{1,2}^{\text{пар}}(t_3) = pp + pq_o + q_op = p^2 + 2pq_o. \quad (4.2)$$

Если далее рассматривать в составе резервируемого узла три, четыре и т.д. элементов, то можно прийти к формуле вида

$$P_{1,2,\dots}^{\text{пар}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q_o^j, \quad (4.3)$$

где m – общее число элементов резервируемого узла;

C_m^{m-j} – биномиальные коэффициенты формулы Ньютона (коэффициенты бинома Ньютона).

Эти коэффициенты могут быть вычислены по формуле

$$C_m^{m-j} = \frac{m!}{(m-j)!j!}. \quad (4.4)$$

Следует знать, что

$$C_m^{m-j} = C_m^j,$$

поэтому в формуле (4.3) величина C_m^{m-j} может быть заменена на величину C_m^j .

При использовании формулы (4.4) нужно помнить, что $0!=1$.

В случае последовательного способа соединения элементов резервируемого узла формула для подсчёта вероятности безотказной работы резервируемого узла примет вид

$$P_{1,2,\dots}^{\text{посл}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q_{\text{кз}}^j. \quad (4.5)$$

Нетрудно увидеть, что формула (4.5) получается из формулы (4.3) путём замены вероятности q_0 на вероятность $q_{кз}$.

При смешанном способе соединения элементов резервируемого узла анализ безотказности зависит от конкретной схемы соединения элементов.

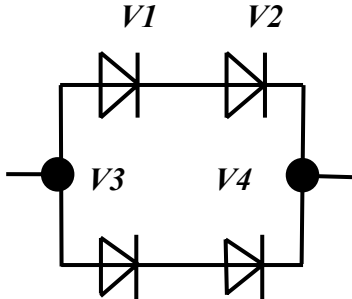


Рис. 4.8 Смешанный способ соединения диодов резервируемого узла (последовательно-параллельная схема)

Покажем, как выполнять анализ безотказности на примере смешанного способа соединения элементов (рис.4.8).

Будем предполагать, что диоды резервируемого узла одинаковы и имеют следующие значения характеристик p , q_0 , $q_{кз}$ для времени t_3 :

$$p(t_3) = p = 0,8;$$

$$q_0(t_3) = q_0 = 0,1;$$

$$q_{кз}(t_3) = q_{кз} = 0,1.$$

Рассматривая схему соединения диодов (см. рис. 4.8), можно увидеть, что две последовательные цепочки соединены между собой параллельно, отсюда и название схемы: последовательно-параллельная.

В литературе [6] описывается приём анализа, основанный на рассмотрении состояний резервируемого узла. Так, в данном примере узел будет иметь $3^4=81$ состояние, ибо каждый диод может принять одно из трех состояний, а в узле соединено четыре элемента.

Но из 81 состояния безотказной работе узла в целом благоприятствуют только 39 [6]. Поэтому можно указать эти состояния, а затем вероятность безотказной работы узла найти как сумму их вероятностей. Однако такой путь длинный, легко допустить неточность. Поэтому предлагается другой, более рациональный, способ.

Суть его состоит в следующем. Вначале диоды последовательной цепочки сворачиваются в один эквивалентный (рис.4.9), причём он будет иметь свои характеристики, а именно $p_{э}$, $q_{0э}$, $q_{кзэ}$.

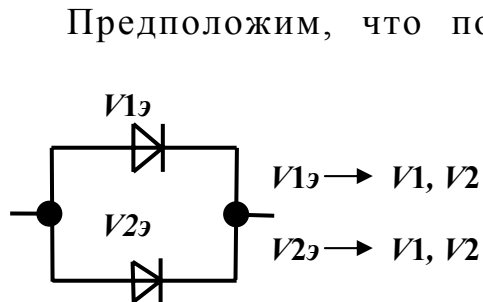


Рис. 4.9. Свертка диодов последовательных цепочек в эквивалентный диод

Предположим, что показатели безотказности эквивалентного диода $p_{э}$, $q_{0э}$, $q_{кзэ}$ каким-либо образом найдены. Тогда задача определения вероятности безотказной работы исходного узла (см. рис. 4.8) сводится к ранее рассмотренной задаче – параллельному соединению элементов резервируемого узла (см. рис. 4.9). Применим изложенный подход к рассматриваемому примеру (см. рис.4.8).

Применяя формулу (4.5) для случая двух последовательно соединенных элементов, найдем вероятность безотказной работы эквивалентного диода. Получим

$$p_{\text{э}} = p^2 + 2pq_{\text{кз}} = 0,8^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,1 = 0,8.$$

Далее определим для эквивалентного диода характеристики $q_{\text{оэ}}$, $q_{\text{кзэ}}$. Нетрудно установить, что для последовательного соединения только одно состояние благоприятствует отказу цепочки по типу “короткое замыкание”, а именно – отказ данного типа обоих диодов последовательной цепочки. Поэтому

$$q_{\text{кзэ}} = q_{\text{кз}} \cdot q_{\text{кз}} = q_{\text{кз}}^2 = 0,1^2 = 0,01.$$

Значение характеристики $q_{\text{оэ}}$ найдем, пользуясь соотношением (4.1). Получим

$$q_{\text{оэ}} = 1 - (p_{\text{э}} + q_{\text{кзэ}}) = 1 - (0,8 + 0,01) = 0,19.$$

Окончательно вероятность безотказной работы всего резервируемого узла (см. рис.4.8) определим, пользуясь рис. 4.9 и формулой (4.3), или ее реализацией (4.2) для случая двух параллельно соединенных элементов.

$$P_{\Sigma}(t_3) = P_{V1_{\text{э}}, V2_{\text{э}}}^{(\text{пар})}(t_3) = p_{\text{э}}^2 + 2p_{\text{э}}^2 q_{\text{оэ}} = 0,8^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,19 = 0,944.$$

В случае соединения элементов по параллельно-последовательной схеме выполняется свертка в эквивалентный элемент цепочек из параллельно соединенных элементов (рис.4.10).

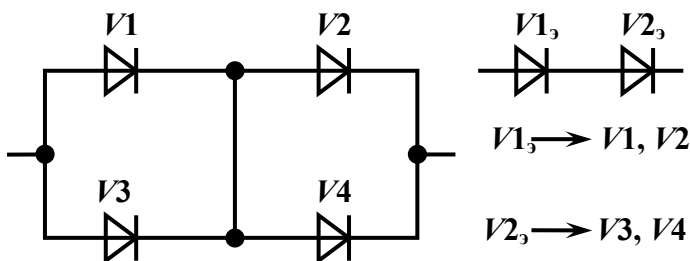


Рис.4.10. Параллельно-последовательная схема соединения элементов резервируемого узла и ее свертка

Анализ безотказности в этом случае аналогичен вышерассмотренному примеру.

Заканчивая рассмотрение анализа безотказности устройств при наличии постоянного резервирования, заметим, что при таком резервировании характер отказов элементов играет принципиальную роль с точки зрения безотказности устройств в целом и обязательно должен приниматься во внимание.

4.6. Характеристика резервирования замещением

При резервировании замещением основной элемент в случае его отказа отключается от электрической схемы, и вместо него подключается один из резервных элементов. Для подключения резервного элемента используется переключающее устройство. Такие устройства могут работать в автоматическом режиме либо быть ручными.

Основной характеристикой резервирования замещением является кратность резерва [1, 2], выражаемая несокращенной дробью и определяемая отношением

$$R = \frac{r}{n}, \quad (4.6)$$

где r – количество резервных элементов, способных замещать основные элементы данного типа; $r = m - n$ (см. рис.4.2);

n – количество основных элементов, резервируемых резервными элементами.

Примеры оценки кратности резерва понятны из рис.4.11.

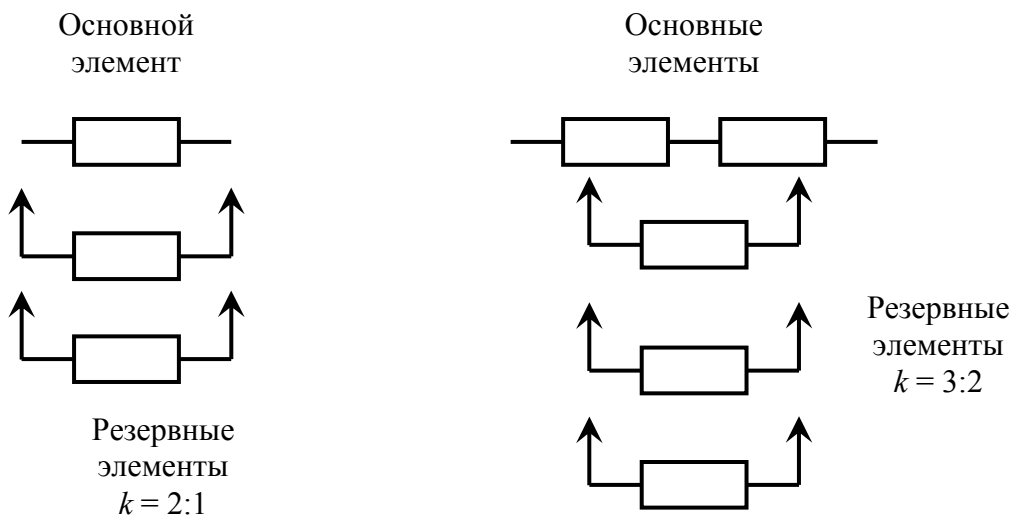


Рис.4.11. Примеры оценки кратности резерва

Из рис.4.11 видно, что дробь, описывающую кратность резерва, нельзя сокращать, так как будет потеряна информация о характеристиках резервирования.

Резервирование с кратностью резерва один к одному называют дублированием.

При резервировании замещением резервные элементы до вступления их в работу могут находиться в одном из трёх режимов нагружения:

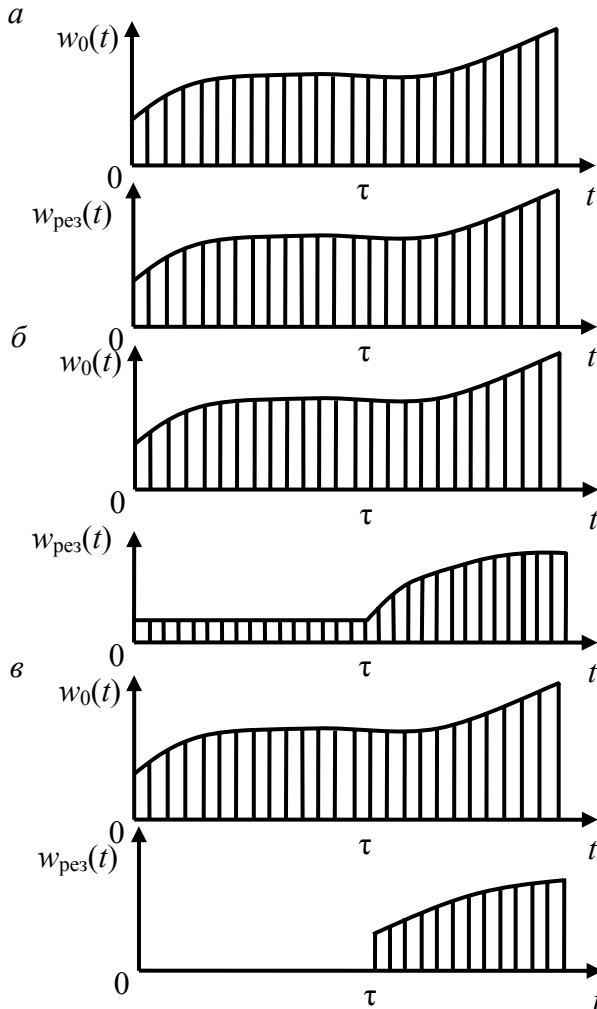


Рис.4.12. Плотность распределения времени безотказной работы резервируемой аппаратуры:

- а** – нагруженный резерв;
- б** – облегченный резерв;
- в** – ненагруженный резерв

нагруженном резерве или “холодном” резервировании. При этом условия, в которых находится резерв, настолько легче рабочих, что практически резервные элементы начинают расходовать свой ресурс только с момента включения их в работу вместо отказавших (рис.4.12,в).

Основные достоинства резервирования замещением:

- 1) большой выигрыш в надёжности по сравнению с постоянным резервированием (в случаях ненагруженного и облегченного резерва);
- 2) отсутствие необходимости дополнительной регулировки в случае замещения основного элемента резервным, так как основной и резервный элементы одинаковы.

а) в нагруженном режиме. В этом случае говорят о нагруженном резерве или “горячем” резервировании. Здесь резерв находится в таком же электрическом режиме, как и основной элемент, и его ресурс вырабатывается одновременно с ресурсом основного элемента, точно так же, как и при постоянном резервировании (рис.4.12,а);

б) в облегчённом режиме. В этом случае говорят об облегчённом резерве или “теплом” резервировании. Ресурс резервных элементов начинает расходоваться с момента включения всего устройства в работу, однако интенсивность расхода ресурса резервных элементов до момента включения их вместо отказавших (время τ) значительно ниже, чем в обычных рабочих условиях (рис.4.12,б).

в) в ненагруженном режиме. В этом случае говорят о ненагруженном резерве или “холодном” резервировании. При этом условия, в которых находится резерв, настолько легче рабочих, что практически резервные элементы начинают расходовать свой ресурс только с момента включения их в работу вместо отказавших (рис.4.12,в).

Основные недостатки резервирования замещением:

- 1) сложность технической реализации и связанное с этим увеличение массы, габаритов и стоимости всего резервируемого РЭУ;
- 2) перерыв в работе в случае замещения отказавшего элемента;
- 3) необходимость иметь переключающее устройство высокой надёжности. Для обеспечения этого иногда приходится резервировать сами переключающие устройства, обычно используя постоянное резервирование. На практике считается, что надёжность переключающего устройства должна быть, по меньшей мере, на порядок выше надёжности резервируемого элемента.

4.7. Анализ безотказности РЭУ при наличии резервирования замещением (нагруженный резерв)

При анализе следует иметь в виду, что характер отказов элементов при резервировании замещением не играет никакой роли, так как отказавший элемент отключается от электрической схемы и вместо него подключается исправный.

Методы анализа безотказности зависят от того, в каком режиме нагружения находится резерв. Рассмотрим приёмы анализа безотказности устройств в случае нагруженного резерва, проиллюстрировав их на примере.

Пример 4.1. Пусть схема (модель) расчёта надёжности имеет вид, показанный на рис.4.13.

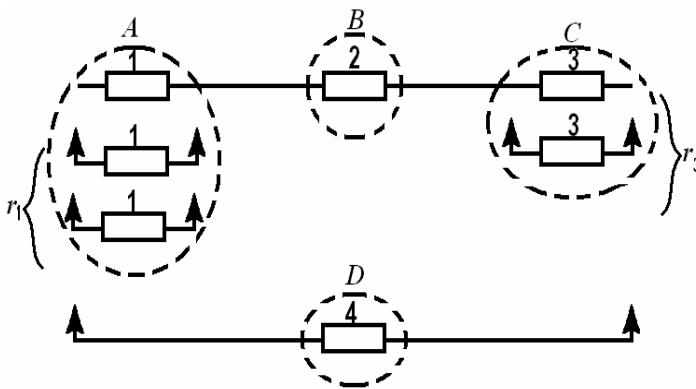


Рис.4.13. Схема расчёта надёжности

Будем считать, что основной и резервные элементы одинаковы, а элемент 4 имеет минимальную функционально необходимую структуру, т.е. эквивалентен цепочке, показанной на рис. 4.14.

Предположим, что для заданного времени работы устройства t_3 известны вероятности безотказной работы элементов 1, 2, 3:

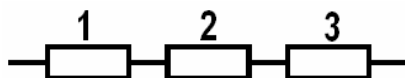


Рис. 4.14. Структура элемента 4

$$p_1(t_3) = p_1 = 0,6;$$

$$p_2(t_3) = p_2 = 0,95;$$

$$p_3(t_3) = p_3 = 0,8.$$

Решение. Из рис.4.13 видно, что устройство состоит из узла A (который представляет собой резервируемую структуру с кратностью резерва два к одному), узла B (нерезервируемый элемент), узла C , (резервируемая структура с кратностью резерва один к одному) и узла D (резервный элемент для устройства в целом).

1. Определим вероятность безотказной работы элемента 4, помня, что с точки зрения надёжности он состоит из трех последовательно соединенных элементов.

С использованием основного расчётного соотношения (3.1) можно определить вероятность безотказной работы элемента 4:

$$p_4 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = 0,6 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \approx 0,46.$$

2. Рассмотрим узел A . Вначале определим вероятность отказа элемента 1. Получим

$$q_1 = 1 - p_1 = 1 - 0,6 = 0,4.$$

Нетрудно понять, что отказ узла A в целом произойдет тогда, когда откажут как основной элемент, так и два резервных. Вероятность этого события может быть подсчитана как

$$q_A = q_1 \cdot q_1 \cdot q_1 = q_1^3 = 0,4^3 = 0,064.$$

Здесь и далее считаем надёжность переключающих устройств идеальной, т.е. $P_{\text{перекл}} = 1$. В случае произвольного числа резервных элементов r вероятность отказа резервируемого узла подсчитывается по формуле

$$q_y = q^{r+1}.$$

3. Рассмотрим узел C . Определим вероятность отказа элемента типа 3:

$$q_3 = 1 - q_3 = 1 - 0,8 = 0,2.$$

Подсчитаем вероятность отказа узла C , получим

$$q_C = q_3^{r_3+1} = q_3^2 = 0,2^2 = 0,04.$$

4. Подсчитаем вероятность безотказной работы устройства, состоящего из узлов A , B , C . Вначале определим вероятность безотказной работы каждого из них:

$$p_A = 1 - q_A = 1 - 0,064 = 0,936;$$

$$q_B = p_2 = 0,95;$$

$$p_C = 1 - q_C = 1 - 0,04 = 0,96.$$

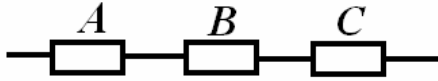


Рис.4.15. Соединение узлов A, B, C

Узлы A, B, C с точки зрения надёжности соединены последовательно (рис.4.15).

Следовательно, используя основное расчётное соотношение, их общую вероятность безотказной работы можно определить как

$$p_{ABC} = p_A \cdot p_B \cdot p_C = 0,936 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \approx 0,85.$$

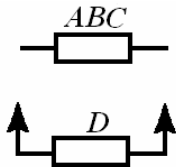


Рис.4.16. Соединение узлов ABC и D

5. Подсчитаем вероятность безотказной работы устройства в целом (с учётом узла D). Узел D резервирует узлы A, B, C , что схематически изображено на рис.4.16.

Нетрудно понять, что отказ устройства в целом наступит при отказе как структуры ABC , так и узла D . Следовательно,

$$\begin{aligned} q_{РЭУ} &= q_{ABC} \cdot q_D = q_{ABC} \cdot q_4 = \\ &= (1 - p_{ABC}) \cdot (1 - p_4) = \\ &= (1 - 0,85)(1 - 0,46) = 0,15 \cdot 0,54 \approx 0,08. \end{aligned}$$

Тогда

$$p_{РЭУ} = 1 - q_{РЭУ} = 1 - 0,08 = 0,92.$$

Заметим, что в случае отсутствия какого-либо резервирования данного РЭУ вероятность безотказной работы была бы равна значению 0,46.