

УДК 621.316.722.076.12

**А.П. Ковалев /д.т.н./, Д.Ю. Дьяченко, А.А. Мартынов**  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ, ЭЛЕМЕНТЫ КОТОРЫХ МОГУТ НАХОДИТЬСЯ В ТРЕХ НЕСОВМЕСТИМЫХ СОСТОЯНИЯХ**

*С использованием понятий «сечение» и «минимальное сечение» предложен метод оценки надежности сложных по структуре систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, отказавшем – отказ типа обрыв цепи и отказавшем – отказ типа короткое замыкание. Приведен пример расчета.*

***Ключевые слова:** система, минимальное сечение, сложная схема, вероятность, узел нагрузки.*

### **Постановка проблемы**

Для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, используют метод минимальных сечений [1,2].

Следует разобрать новый принцип построения схем замещения для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем таким образом, чтобы этот метод позволил оценивать надежность систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях (работоспособное, неработоспособное – отказ типа обрыв цепи, неработоспособное – отказ типа короткое замыкание). Это позволит учитывать в схемах замещения систем электроснабжения отказы в срабатывании защитных коммутационных аппаратов и таким образом значительно повысить точность расчетов.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, известны три метода, основанные на использовании: разложения сложной структуры по базовому элементу, применения преобразований треугольник-звезда и звезда-треугольник, а также на использовании алгебры кортежей [3-6].

Все предлагаемые методы достаточно сложны в использовании для инженерных расчетов, поэтому усовершенствование метода минимальных сечений позволит достаточно просто получить нижнюю оценку вероятности безотказной работы системы при учете двух видов несовместных отказов ее элементов.

### **Цель (задачи) исследования**

Целью данной работы является совершенствование метода оценки надежности сложных

невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

### **Основной материал исследования**

К невосстанавливаемым будем относить такие системы, восстановление которых по каким-либо причинам невозможно в рассматриваемый период времени [1].

Под системой в данном случае будем понимать совокупность взаимосвязанных, конструктивно независимых изделий, которые обладают свойством перестраивать свою структуру в результате случайного повреждения ее элементов, без нарушения (либо частичного нарушения) выполняемой задачи.

Элементы с тремя несовместными состояниями: работоспособное, отказ типа обрыв цепи и отказ типа короткое замыкание (КЗ) можно выделить в таких системах, как водопровод, воздухоподающие трубопроводы, газопроводы, трубопроводы и т.п.

Аналогами элементов с тремя состояниями в таких системах могут быть краны, вентили различных типов, запорная арматура, заглушки и другие виды прерывателей потока (жидкости, газа и т.д.), для которых в неработоспособном состоянии поток не прерывается (короткое замыкание) или не передается (обрыв цепи) [3].

Защитный коммутационный аппарат и электрооборудование, которое входит в зону действия его автоматических средств защиты, будем рассматривать как элемент системы, который может находиться в трех несовместных состояниях.

Например, при КЗ в элементе сети, который находится в зоне действия релейной защиты (РЗ) коммутационного аппарата, происходит отключение его от источника электроснабжения. Такие повреждения будем относить к отказам типа обрыв цепи.

К отказам типа короткое замыкание будем относить такие повреждения: КЗ в защищаемом элементе сети, при котором происходит отказ в срабатывании автоматической системы отключения коммутационного аппарата, т.е. когда через данный коммутационный аппарат проходит сквозной аварийный ток, а система его РЗ не срабатывает.

Для оценки надежности технических систем широкое распространение получили элементные методы [7-17]. В этих методах предполагается, что электрооборудование в схемах замещения систем электроснабжения состоит из самостоятельных (в смысле анализа надежности) элементов.

Под узлами схемы замещения понимаются физические пункты, которые непосредственно связаны не менее чем с тремя направлениями передачи энергии, т.е. это обычно сборные шины или секции распределительных пунктов [9].

С использованием принципиальной схемы системы электроснабжения составляется схема замещения для оценки надежности потребителей, которые получают электроэнергию от рассматриваемого узла нагрузки.

Все независимые источники электроснабжения системы объединяются в одну точку, и она считается абсолютно надежной и является входом схемы замещения [8-10].

Все повреждения в схеме электроснабжения выше выбранной точки входа в расчетах не учитываются.

Под элементом  $i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) в схеме замещения системы электроснабжения будем понимать совокупность оборудования: защитный коммутационный аппарат и электрооборудование, которое входит в зону действия его РЗ.

Выходом схемы замещения системы электроснабжения являются сборные шины, от которых получают электроэнергию потребители.

Если отказ  $i$ -го элемента (отказ типа обрыв цепи) не влияет на работоспособность граничных ему узлов, то в этом случае расчетная схема замещения совпадает с электрической [9].

Предположим, что все рассматриваемые элементы, из которых состоит система, могут отказывать независимо друг от друга; каждый элемент системы может находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособном – отказ типа обрыв цепи, неработоспособном – отказ типа короткое замыкание; потоки отказов элементов типа обрыв цепи и типа короткое замыкание – простейшие; пропускная способность элементов не ограничена, также как и способность сдерживать поток энергии (жидкости, газа, электрического тока) независимо от количества короткозамкнутых

элементов; после выхода из строя элемент не восстанавливается (не заменяется новым) в рассматриваемый период времени [3].

Обозначим через  $P_i$  вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы,  $q_{Oi}$  – вероятность появления отказов 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.

$$P_i + q_{Oi} + q_{Si} = 1. \quad (1)$$

Индексы  $O$  и  $S$  в формуле (1) указывают на то, что учитываются повреждения элемента, которые приводят к отказам типа обрыв цепи либо отказам типа короткое замыкание, соответственно.

В случае, если элементы системы подвержены двум типам несовместных отказов: отказ типа обрыв цепи и отказ типа короткое замыкание, вероятность его отказов в течение времени  $t$  можно определить следующим образом [4]:

$$q_{Oi}(t) = \frac{\lambda_{Oi}}{\lambda_{Oi} + \lambda_{Si}} \cdot [1 - e^{-(\lambda_{Oi} + \lambda_{Si})t}]; \quad (2)$$

$$q_{Si}(t) = \frac{\lambda_{Si}}{\lambda_{Oi} + \lambda_{Si}} \cdot [1 - e^{-(\lambda_{Oi} + \lambda_{Si})t}], \quad (3)$$

где  $\lambda_{Oi}$ ,  $\lambda_{Si}$  – постоянные интенсивности отказов  $i$ -го элемента при учете его отказов типа обрыв цепи и типа короткое замыкание, соответственно;  $t$  – текущее время работы  $i$ -го элемента системы.

Под вероятностью безотказной работы невозстанавливаемой системы, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, будем принимать меру ее надежности, которая характеризуется вероятностью того, что в течение заданного интервала времени не произойдут такие случайные события, в результате которых разрывается связь или проходит сквозной аварийный ток между входом и выходом схемы замещения, при условии, что в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии.

Для невозстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, справедлива формула:

$$R_H = 1 - Q_{OH} - Q_{SH}, \quad (4)$$

где  $R_H$  – нижняя оценка вероятности того, что не произойдут такие случайные события, в результате которых разорвется связь или пройдет

сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения;  $Q_{OH}$ ,  $Q_{SO}$  – нижняя оценка вероятности того, что произойдет разрыв связи или пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения, соответственно.

Под простой по определению схемой замещения системы будем понимать схему, элементы которой могут соединиться последовательно, параллельно, последовательно-параллельно либо параллельно-последовательно.

Для простой по определению схемы замещения системы, которая состоит из  $n$  логически последовательно соединенных элементов, отказ типа обрыв цепи любого из  $i$  элементов ( $i = \overline{1, n}$ ), приводит к разрыву связи между узлами «вход» и «выход».

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения  $q_{O_i}$ , то вероятность разрыва связи между узлами «вход» и «выход»  $Q_O$  определим следующим образом:

$$Q_O = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_{O_i}). \quad (5)$$

В том случае, если у каждого из  $n$  логически последовательно соединенных элементов произойдет отказ типа короткое замыкание в каждом из  $i$  элементов, это приведет к тому, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения  $q_{S_i}$ , то вероятность  $Q_S$  того, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток, найдем с помощью формулы:

$$Q_S = \prod_{i=1}^n q_{S_i}. \quad (6)$$

Используя формулы (4-6), находим для системы, которая состоит из  $n$  логически последовательного соединения элементов, вероятность  $R_n$  того, что не пройдут такие случайные события, в результате чего разорвется связь или пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения:

$$R_n = \prod_{i=1}^n (1 - q_{O_i}) - \prod_{i=1}^n q_{S_i}. \quad (7)$$

Для простой схемы замещения системы, которая состоит из  $m$  логически параллельно соединенных элементов, отказ типа обрыв цепи любого из  $j$  элементов ( $j = \overline{1, m}$ ) приводит к обрыву связи между узлами «вход» и «выход».

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения  $q_{O_j}$ , то вероятность  $Q_O$  того, что произойдет разрыв между узлами «вход» и «выход», находим, пользуясь формулой:

$$Q_O = \prod_{j=1}^m q_{O_j}. \quad (8)$$

В том случае, если у каждого из  $m$  логически параллельно соединенных элементов произойдет отказ типа короткое замыкание, это приведет к тому, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов  $q_{S_j}$  ( $j = \overline{1, m}$ ) элементов схемы замещения, которая состоит из  $m$  логически параллельно соединенных элементов, тогда  $Q_S$  – вероятность того, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток. Найдем  $Q_S$ , используя формулу:

$$Q_S = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - q_{S_j}). \quad (9)$$

Подставив формулы (8-9) в формулу (4), находим для системы, которая состоит из  $m$  логически параллельно соединенных элементов, вероятность  $R_m$  того, что не произойдут такие случайные события, в результате которых рвется связь или пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения:

$$R_m = \prod_{j=1}^m (1 - q_{S_j}) - \prod_{j=1}^m q_{O_j}. \quad (10)$$

Формулы (7) и (10) справедливы при выполнении условия:  $q_{O_i} + q_{S_i} < 1$ ,  $q_{O_j} + q_{S_j} < 1$  и получены различными способами [4,5].

Под сложной по структуре схемой замещения системы будем понимать схему, в состав которой входит хотя бы одна группа элементов, соединенных в виде логической звезды или треугольника.

Для приведения сложной схемы замещения, элементы которой подвергаются отказам типа обрыв цепи, к схеме простой воспользуемся понятиями «сечение» и «минимальное сечение» [1].

Сложную по определению схему замещения системы, при учете двух несовместных типов отказов элементов (типа обрыв цепи и типа короткое замыкание), можно заменить двумя эквивалентными по надежности простыми, используя понятия «сечение» и «минимальное сечение».

Под отказом сложной по определению схемы замещения системы, при учете отказов ее элементов типа обрыв цепи будем понимать появ-

ление такого случайного события, в результате которого происходит повреждение некоторых ее элементов и прерывается связь между ее узлами «вход» и «выход» (между источниками энерго-снабжения и его потребителями).

Под сечением  $S$  схемы замещения сложной системы будем понимать совокупность элементов, выход из строя которых (отказ типа обрыв цепи) приводит к разрыву связи между узлами «вход» и «выход».

Под минимальным сечением  $S_{min}$  схемы замещения сложной системы будем понимать сечение, у которого предполагается, что хотя бы один элемент оказался абсолютно надежным, в результате чего отказы типа обрыв цепи оставшихся в этом сечении элементов не будут более составлять сечение, так как при этом не происходит разрыв связи между входом и выходом.

С использованием исходной схемы замещения сложной структуры, понятия «минимальное сечение»  $S_{min}$ , учитывая, что элементы системы подвергаются отказам типа обрыв цепи, и если заданы вероятности отказов каждого из  $i$  элементов  $q_{oi}$  ( $i = \overline{1, n}$ ), строятся схемы минимальных сечений.

При построении схемы замещения минимальных сечений  $S_{min}$ , при учете отказов элементов типа обрыв цепи, выделяют одноэлементные, двухэлементные, трехэлементные и т.д. минимальные сечения. После получения отдельных групп минимальных сечений их соединяют последовательно между собой, начиная от минимального сечения, которое состоит из одного или двух параллельно соединенных элементов, и заканчивая минимальным сечением, которое состоит из максимально возможного числа параллельно соединенных элементов.

Используя простую по определению схему замещения минимальных сечений, формулы (5) и (8), определяем нижнюю оценку ее вероятности отказов  $Q_{OH}$  [1].

Под отказом сложной схемы замещения системы, при учете отказов элементов типа короткое замыкание, будем понимать появление такого случайного события, в результате которого между узлами «вход» и «выход» схемы замещения протекает сквозной аварийный ток.

Под сечением  $\tilde{S}$  сложной схемы замещения системы будем понимать совокупность элементов, выход из строя которых (учитывая отказы элементов типа короткое замыкание) приводит к тому, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения протекает сквозной аварийный ток.

Под минимальным сечением  $\tilde{S}_{min}$  сложной

схемы замещения системы будем понимать сечение, у которого предполагаем, что хотя бы один элемент оказался абсолютно надежным, в результате чего отказы типа короткое замыкание оставшихся в этом сечении элементов уже не будут более составлять сечение, так как при этом не происходит протекание сквозного аварийного тока между узлами «вход» и «выход».

Используя исходную схему замещения сложной системы, понятия  $\tilde{S}_{min}$ , учитывая, что в элементах системы наблюдаются отказы типа короткое замыкание и известны вероятности отказов каждого из ее  $i$  элементов  $q_{si}$  ( $i = \overline{1, n}$ ), строим схему минимальных сечений следующим образом.

Каждое минимальное сечение представляет собой минимальный набор логически последовательно соединенных элементов, отказ которых (учитывая отказ типа короткое замыкание) приводит к тому, что происходит протекание сквозного аварийного тока между узлами «вход» и «выход» схемы замещения системы.

Все полученные минимальные сечения соединяются между собой в параллельную группу, в результате чего получим простую по определению схему замещения минимальных сечений системы, при учете отказов элементов схемы замещения типа короткое замыкание.

Используя простую по определению схему замещения минимальных сечений, при учете отказов элементов типа короткое замыкание, формулы (6) и (9), находим нижнюю оценку ее вероятности отказов  $Q_{SH}$ .

Исходными данными для построения схемы минимальных сечений (учитывая отказы элементов схемы замещения типа обрыв цепи) являются: схема замещения системы с указанием всех ее узлов; номера элементов, которые соединяют узлы между собой; известны узлы «вход» и «выход»; вероятности безотказной работы элементов  $q_{oi}$  ( $i = \overline{1, n}$ ).

Для построения схемы замещения минимальных сечений следует заполнить табл. 1 следующим образом:

- в колонку 1 первой строки ставим символ  $A_0$  – узел, который обозначает вход в схеме замещения;
- в колонку 2 первой строки записываются номера элементов схемы замещения, непосредственно связанных с узлом  $A_0$ ;
- в колонку 3 записываются эти же номера элементов схемы замещения, которые и являются сечением, его же заносят в колонку 4, так как эти сечения будут минимальными по определению;
- в колонку 1 второй строки ставим узлы  $A_0$

и  $A_i$ , которые соединяются между собой с помощью элемента  $j$  ( $j = \overline{1, m}$ ), где  $n$  – число элементов в схеме замещения, непосредственно связанных с узлом  $A_0$ ;

– в колонку 2 ставим столбец, который состоит из двух строк: в верхнюю строку записываем номера элементов схемы замещения, которые соединяются с узлом  $A_0$ , а во вторую строку записываются номера элементов, которые непосредственно соединяют узел  $A_j$  с другими узлами;

– одинаковые номера элементов схемы замещения, которые входят в первую и вторую строки, вычеркиваем и получаем сечение. Полученное таким образом сечение заносим в колонку 3, затем его анализируем. Если полученное сечение является минимальным (по определению), то его заносят в колонку 4, если нет, то четвертая колонка остается незаполненной (т.е. такого минимального сечения не существует);

– после установления всех связей между узлами  $A_0$  и  $A_j$  и построения минимальных сечений к этой группе прибавляется узел  $A_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), который через элемент  $j$  схемы замещения связан с узлом  $A_j$ , или он связан элементом с узлом  $A_0$  (имеет место при числе элементов, непосредственно связанных с  $A_0$ ,  $n \geq 3$ ), и процедура получения минимального сечения повторяется, т.е. в колонку 1 заносятся узлы  $A_0, A_j, A_i$ ;

– в колонку 2 заносят столбец, который состоит из трех строк: в первую строку записываются номера элементов схемы замещения, которые соединяются с узлом  $A_0$ , во вторую – элементы, которые соединяются с узлом  $A_j$ , и в третью – элементы, которые соединяются с узлом  $A_i$ ;

– четное число одинаковых номеров элементов, которые входят в разные строки, вычерчи-

ваются, полученное сечение записывается в колонку 3 и после его анализа, если оно является минимальным (по определению), его записывают в колонку 4;

– описанная выше процедура получения минимальных сечений будет повторяться до тех пор, пока в первую колонку табл. 1 не будут внесены все узлы схемы замещения без последнего, который обозначает выход схемы замещения, а затем составляются столбцы из строк, каждая из которых состоит из номеров элементов, соединяющихся с данным узлом;

– вычеркиваем четное число номеров элементов схемы замещения, которые входят в разные строки, а затем получаем последнее минимальное сечение;

– номера элементов каждой строки колонки 4 соответствуют определенному минимальному сечению, которое представляется в виде их параллельного соединения (отказ элементов данного минимального сечения приводит к тому, что связь между узлами «вход» и «выход» будет нарушена);

– последовательное соединение минимальных сечений позволяет получить расчетную схему для определения нижней оценки вероятности отказов системы при учете отказов ее элементов типа обрыв цепи.

Для получения схемы замещения минимальных сечений, при учете отказов элементов системы типа короткое замыкание, следует заполнить табл. 2, используя следующие правила:

– в первый столбец первой строки заносится минимальное число узлов схемы замещения, начиная с  $A_0$  – узел входа, и заканчивая узлом выхода –  $A_n$  ( $i = \overline{1, n}$ ), через которые может пройти сквозной аварийный ток;

Табл. 1. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа обрыв цепи

№ строки	Узел схемы замещения	Элементы связи между узлами	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1				
2				
...				

Табл. 2. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа короткое замыкание

№ строки	Минимальное число узлов между входом $A_0$ и выходом $A_n$	Элементы связи между узлами, $i$	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1				
2				
...				

– во второй столбец первой строки записываются номера элементов схемы замещения, которые соединяют между собой отдельные узлы, занесенные в первый столбец первой строки;

– в третий столбец первой строки схемы замещения записываем номера элементов второго столбца первой строки, повреждения которых (отказ типа короткое замыкание) приводят к тому, что через узлы  $A_0$  и  $A_n$  пройдет сквозной аварийный ток, т.е. получится сечение;

– анализируем полученное сечение: если оно получилось минимальным (по определению), то номера его элементов записываем в колонку 4 первой строки, а если нет – четвертая колонка остается незаполненной, т.е. такого минимального сечения не существует;

– после получения первого минимального сечения процедура повторяется до тех пор, пока не будут перечислены все существующие в приведенной схеме замещения минимальные сечения;

– каждое полученное минимальное сечение (табл. 2, четвертый столбец) представляется в виде последовательно соединенных элементов (номера элементов занесены в колонку 4);

– параллельное соединение всех полученных минимальных сечений позволяет получить расчетную схему для определения нижней оценки вероятности отказов системы при учете отказов ее элементов типа короткое замыкание.

С использованием полученных алгоритмов построения схем минимальных сечений с учетом двух несовместных типов отказов элементов схемы замещения (отказ типа обрыв цепи и отказ типа короткое замыкание) – составляются схемы замещения минимальных сечений. Используя формулы (5), (8) и (6), (9), заданные (из условия задачи) вероятности  $q_{O_i}$ ,  $q_{S_i}$  ( $i = \overline{1, n}$ ) элементов схемы замещения, можно определить нижнюю оценку  $Q_{OH}$  вероятности того, что не произойдет разрыв связи между узлами «вход» и

«выход» схемы замещения и  $Q_{SH}$  вероятности того, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Нижняя оценка вероятности  $R_H$  того, что не произойдет разрыв связи или не пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения, определяется с помощью формулы (4).

Описанная выше методика построения схем замещения минимальных сечений позволяет оценивать надежность сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Пример. Для схемы замещения системы (рис. 1) заданы следующие исходные данные:

$$q_{O1}=0,0127, q_{O2}=0,0327, q_{O3}=0,0182, q_{O4}=0,0335, \\ q_{O5}=0,0721, q_{O6}=0,0117, q_{O7}=0,0823, \\ q_{S1}=0,0107, q_{S2}=0,0182, q_{S3}=0,0115, q_{S4}=0,0132, \\ q_{S5}=0,0128, q_{S6}=0,0173, q_{S7}=0,0125.$$

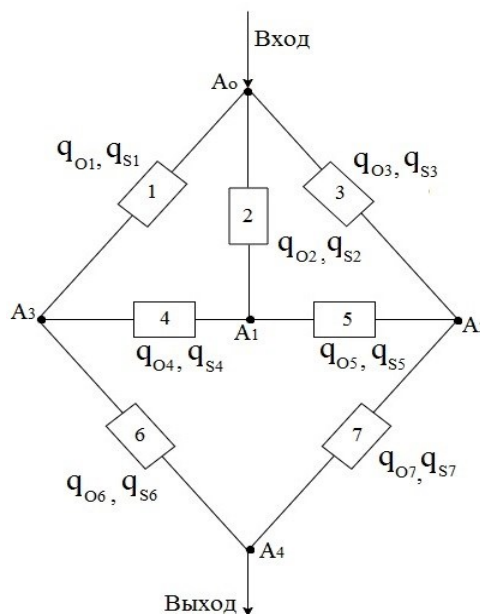


Рис. 1. Схема замещения системы

Табл. 3. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа обрыв цепи

№ строки	Узел схемы замещения	Элементы связи между узлами	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1	$A_0$	1.2.3	1.2.3	1.2.3
2	$A_0 + A_1$	1.2.3, 2.4.5	1.3.4.5	1.3.4.5
3	$A_0 + A_2$	1.2.3, 3.5.7	1.2.5.7	1.2.5.7
4	$A_0 + A_3$	1.2.3, 1.4.6	2.3.4.6	2.3.4.6
5	$A_0, A_1 + A_3$	1.2.3, 2.4.5, 1.4.6	3.5.6	3.5.6
6	$A_0, A_1 + A_2$	1.2.3, 2.4.5, 3.5.7	1.4.7	1.4.7
7	$A_0, A_2 + A_3$	1.2.3, 3.5.7, 1.4.6	2.4.5.6.7	-
8	$A_0, A_1, A_3 + A_2$	1.2.3, 1.4.6, 2.4.5, 3.5.7	6.7	6.7

Табл. 4. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа короткое замыкание

№ строки	Минимальное число узлов между входом $A_0$ и выходом $A_n$	Элементы связи между узлами, $i$	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1	$A_0 + A_2 + A_4$	3.7	3.7	3.7
2	$A_0 + A_3 + A_4$	1.6	1.6	1.6
3	$A_0 + A_1 + A_2 + A_4$	2.5.7	2.5.7	2.5.7
4	$A_0 + A_1 + A_3 + A_4$	2.4.6	2.4.6	2.4.6
5	$A_0 + A_2 + A_1 + A_3 + A_4$	3.5.4.6	3.5.4.6	3.5.4.6
6	$A_0 + A_3 + A_1 + A_2 + A_4$	1.4.5.7	1.4.5.7	1.4.5.7

Определить нижнюю оценку  $R_H$  того, что не произойдет разрыв связи или не пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения. Используя описанный выше алгоритм получения схем минимальных сечений, заполняем табл. 3 и 4.

Сечение № 7 (2.4.5.6.7) (см. табл. 3) не является минимальным, так как включает в себя уже минимальное сечение № 8 (6.7), поэтому колонка 4 в этом случае остается пустой. Используя полученную четвертую колонку табл. 3, строим схему минимальных сечений (рис. 2):

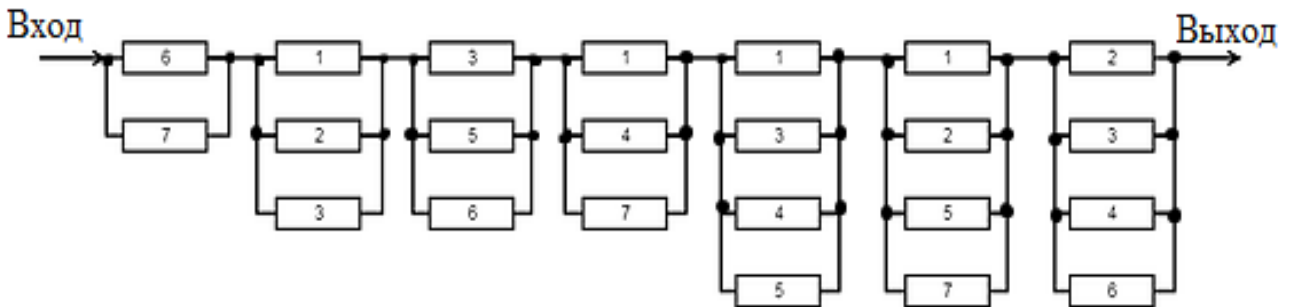


Рис. 2. Схема минимальных сечений при учете отказов элементов типа обрыв цепи

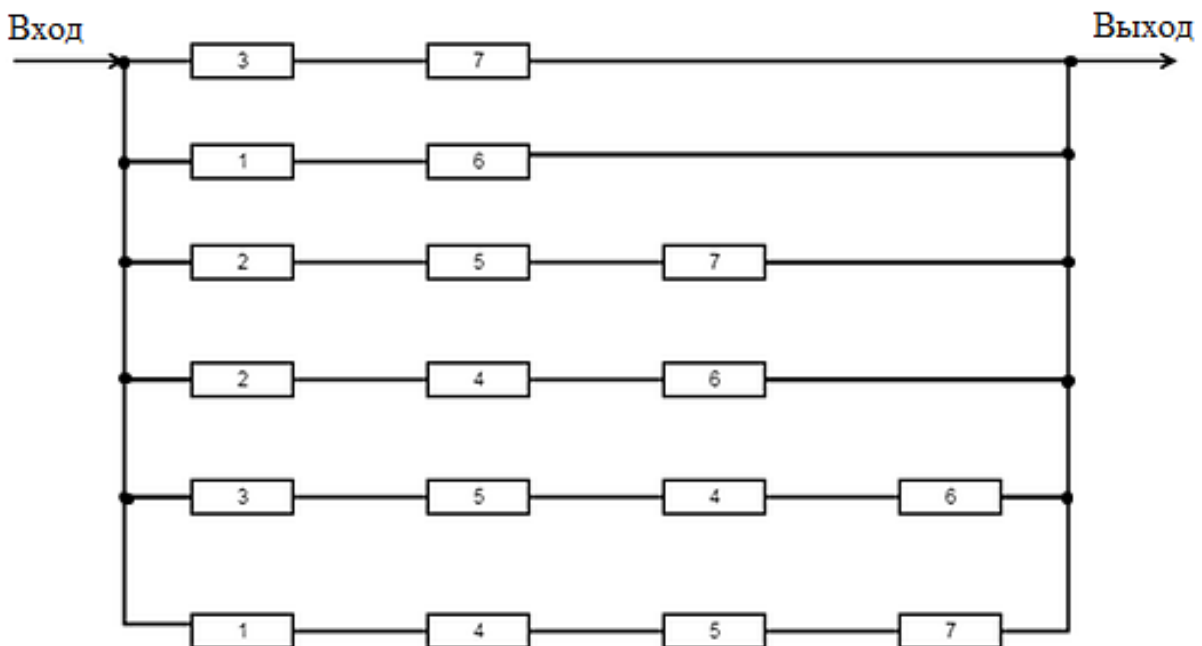


Рис. 3. Схема минимальных сечений при учете отказов элементов типа короткое замыкание

Используя схему замещения (см. рис. 2), формулы (5), (8), находим:

$$Q_{OH} = 1 - (1 - q_{06}q_{07}) \cdot (1 - q_{01}q_{02}q_{03}) \cdot (1 - q_{03}q_{05}q_{06}) \times \\ \times (1 - q_{01}q_{04}q_{07}) \cdot (1 - q_{01}q_{03}q_{04}q_{05}) \times \\ \times (1 - q_{01}q_{02}q_{05}q_{07}) \cdot (1 - q_{02}q_{03}q_{04}q_{06}).$$

Подставляем в полученную формулу значения:  $q_{0i}, i = \overline{1,7}$ , заданные в условии примера, получим:  $Q_{OH} = 0,0011$ .

Для получения схемы замещения минимальных сечений, для случая, когда ее элементы (см. рис. 1) подвергаются отказам типа короткое замыкание, необходимо заполнить табл. 4, используя предложенный ранее алгоритм.

Используя информацию, приведенную в табл. 4 (колонка 4), расчетную схему представим в виде рис. 3.

Используя полученную схему замещения (см. рис. 3), формулы (6), (9), найдем нижнюю оценку  $Q_{SH}$  вероятности того, что произойдет событие, при котором сквозной аварийный ток пройдет между узлами «вход» и «выход» схемы замещения:

$$Q_{SH} = 1 - (1 - q_{S3}q_{S7}) \cdot (1 - q_{S1}q_{S6}) \cdot (1 - q_{S2}q_{S5}q_{S7}) \times \\ \times (1 - q_{S2}q_{S4}q_{S6}) \cdot (1 - q_{S3}q_{S5}q_{S4}q_{S6}) \cdot (1 - q_{S1}q_{S4}q_{S5}q_{S7})$$

Используя исходные данные примера, подставляем их в полученную формулу:  $Q_{SH} = 0,0003$ .

Вероятность того, что не произойдет разрыв связи или не пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения, найдем, используя формулу (4):

$$R_H = 1 - Q_{OH} - Q_{SH}.$$

Подставим полученные значения  $Q_{OH}$  и  $Q_{SH}$  в формулу и определим:

$$R_H = 1 - 0,0011 - 0,0003 = 0,9986.$$

Аналогичный результат был получен при решении этой задачи точным методом расчетов с использованием способа разложения сложной структуры по базисному элементу [3].

### Выводы

Предложена инженерная методика расчетов надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Точность предлагаемой методики для высо-

конадежных систем (вероятность отказов элементов схемы замещения меньше либо равна 0,1) не уступает точным, апробированным методам.

### Список литературы

1. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. – 276 с.
3. Ковалев, А.П. Применение логико-вероятностных методов для оценки надежности структурно-сложных систем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – №9. – 2000. – С. 66-70.
4. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
5. Ковалев, А.П. О преобразовании «Звездотреугольник» при расчетах надежности сложных по структуре схем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – №10. – 1998. – С.70-74.
6. Кулик, Б.А. Логико-вероятностные методы и алгебра кортежей. В сб.: Теория и информационная техника моделирования безопасности сложных систем. – Санкт-Петербург: ИПМАШРАН, 1995. – Препринт 123, Вып.5. – С. 23-28.
7. Нечипоренко, В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность) / В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1977. – 214 с.
8. Эндрени, Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: Пер. с англ. / Дж. Эндрени. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
9. Фонин, Ю.А. Расчет надежности систем электроснабжения / Ю.А. Фонин, А.М. Харченко // Электричество. – 1982. – №8. – С. 5-10.
10. Белоусенко, И.В. О расчете надежности систем электроснабжения газовых промыслов / И.В. Белоусенко и др. // Электричество. – 2004. – №3. – С. 22-27.
11. Ковалев, А.П. Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов / А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Электричество. – 1985. – №10. – С. 52-53.
12. Billinton, R. Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1996-1999 / R. Billinton, M.



- Fotuhi-Firuzabad, L. Settling // IEEE Transactions on Power Systems. – Vol.16. – 2001. – P. 17-19.
13. Billinton, R. Reliability Evaluation of Power Systems / R. Billinton, R.N. Allan. London. – New York: Plenum Press, 1996. – 540 p.
14. Singh, C. System Reliability Modeling and Evaluation / C. Singh, R. Billinto. – London: Hutchinson Educational. – 1977. – 248 p.
15. Конесев, С.Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – С. 57.
16. Ковалев, А.П. Оценка надежности сложных по структуре невосстанавливаемых систем // А.П. Ковалев, Д.И. Воронин, Д.Ю. Дьяченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы III Международной научно-практической конференции, 22.05.2017 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 266-271.
17. Гришко, А.К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А.К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – №2 (16). – С. 51-57.

**A.P. Kovalev /Dr. Sci. (Eng.)/, D.U. Dyachenko, A.A. Martynov**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**IMPROVING THE METHOD FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF UNRECOVERABLE SYSTEMS, THE ELEMENTS OF WHICH MAY BE IN THREE INCOMPATIBLE STATES**

**Background.** Using the concepts of "cross-section" and "minimum cross-section" proposed an approximate method for assessing the reliability of unrecoverable complex structure systems, which elements may be in three incompatible states (operational, failure, failure type "open circuit", failure type "short circuit"). The accuracy of the proposed method of calculating the reliability of systems does not differ from the existing tested ones. The example of the calculation given.

**Materials and/or methods.** Using the concept of "minimum cross-section" for system elements prone to short-circuit failures, the rule to obtain the minimum cross-section substitution schemes proposed, which allows estimating the probability of system failures. Using the known method for obtaining the minimum cross-sections considering failures of circuit elements of the type "open circuit" and the intended method considering failures of elements of the type "short circuit" the test equivalent circuits can be obtained which, together with the known formula, allow obtaining lower system reliability evaluation.

**Results.** With the development of the principles of receiving the "minimum cross-section" schemes, provided that the system components are prone to the failure type "short circuit" it is possible to improve the method of minimum cross sections when considering the components of the failure type "open circuit". The precision of the developed technique is not inferior to that by tested methods.

**Conclusion.** Developed the rules for building equivalent "minimum cross-sections" circuits based on two kinds of component failure (failure type "open circuit" and failure type "short circuit"), which allowed engineering technique for obtaining the lower values of the reliability of the systems studied.

**Keywords:** system, minimum cross-section, complicated scheme, probability, load component.

**Сведения об авторах**

**А.П. Ковалев**

Телефон: +380 (95) 671-37-28

Эл. почта: abrecap@mail.ru

**А.А. Мартынов**

Телефон: +380 (66) 810-33-03

Эл. почта: vladeuvsem@gmail.com

**Д.Ю. Дьяченко**

Телефон: +380 (71) 335-96-83

Эл. почта: lbigapple94@gmail.com

*Статья поступила 26.02.2018 г.*

*© А.П. Ковалев, Д.Ю. Дьяченко, А.А. Мартынов, 2018*

*Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский*