

А.П. Ковалев /д.т.н./, Д.И. Воронин, А.С. Петренко
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

О РАСЧЕТЕ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО СЛОЖНЫХ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ, ЭЛЕМЕНТЫ КОТОРЫХ МОГУТ НАХОДИТЬСЯ В ТРЕХ НЕСОВМЕСТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Предложена методика оценки надежности структурно сложных мостиковых структур с учетом двух видов отказов средств защиты: отказ типа обрыв цепи и отказ в срабатывании. Сложные мостиковые структуры приводятся к одному эквивалентному элементу с помощью преобразования логического треугольника в эквивалентную по надежности звезду и обратного преобразования логического соединения в виде звезды к эквивалентному по надежности соединению в виде треугольника. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: надежность, система, сложная структура, мостиковая структура, треугольник, звезда, вероятность отказов, отказ типа обрыв, отказ в срабатывании, вероятность безотказной работы.

Постановка проблемы

К не восстанавливаемым 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].

В тех случаях, когда необходимо повысить надежность проектируемой системы без изменения надежности комплекствующих ее элементов, обычно вводят избыточные (резервные) элементы или группы элементов, либо вносятся определенные изменения в схему, что позволяет оптимизировать ее структуру.

Методика оценки надежности невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться только в двух несовместных состояниях – работоспособном и отказавшем (отказ типа обрыв цепи), разработаны в достаточной мере [3-6].

В перечисленных методиках расчетов надежности сложных по структуре систем предполагается, что средства их защиты абсолютно надежны. В реальных же системах электроснабжения, газоснабжения, водоснабжения и т.д. средства защиты могут работать правильно, отключать поврежденный участок сети (ручное, автоматическое отключение). Такие повреждения в системе будем относить к отказам типа обрыв цепи, либо отказывать и его не отключать – отказ в срабатывании.

Поэтому учет надежности средств защиты сложных по структуре систем является актуальной научно-технической задачей, решение кото-

рой позволит в значительной степени повысить точность расчетов и тем самым прогнозировать живучесть разрабатываемой системы на этапе проектирования или реконструкции.

Анализ последних исследований и публикаций

Для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, известны методы, основанные на использовании разложения сложной структуры по базовому элементу, применении метода «треугольник – звезда» и «звезда – треугольник», а также на использовании алгебры кортежей [7-10].

Полученные в этих работах формулы не очень удобны к применению, поэтому для систем, у которых вероятность отказов элементов меньше либо равна 0,1 (к таким элементам относятся электрооборудование электрических систем и систем электроснабжения предприятий), следует использовать приближенные формулы переходов «треугольник – звезда» и «звезда – треугольник» и разработать принцип построения схем замещения систем, чтобы оценить их надежность.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является совершенствование методики оценки надежности систем с учетом двух видов несовместных отказов средств защиты.

Основной материал исследования

Под системой в данном случае будем понимать совокупность взаимосвязанных, конструк-

тивно независимых изделий, которые обладают свойством перестраивать свою структуру в результате случайного повреждения ее элементов, без нарушения (либо частичного нарушения) выполняемой задачи. 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 в срабатывании; потоки отказов элементов (обрыв цепи) и отказ в срабатывании простейшие; пропускная способность элементов неограниченна, так же как и способность сдерживать поток энергии (электрического тока, жидкости, газа, информации и т.д.), независимо от количества короткозамкнутых элементов, после выхода из строя элемент не восстанавливается (не заменяется на новый) в рассматриваемый период времени [7].

Обозначим через P_i вероятность безотказной работы i -того элемента системы, q_{oi} – вероятность появления отказов в i -том элементе типа обрыв цепи, а через q_{si} – вероятность появления отказов в i -том элементе типа отказ в срабатывании. 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 в срабатывании, соответственно.

В том случае, если в элементах системы электроснабжения наблюдается два типа несовместных отказов: отказ типа обрыв цепи и отказ в срабатывании, вероятность отказов элемента i , с учетом двух типов несовместных отказов, в течение времени t можно определить, пользуясь формулами [8]:

$$q_{oi}(t) = \frac{\lambda_{oi}}{\lambda_{oi} + \lambda_{si}} \cdot \left[1 - e^{-(\lambda_{oi} + \lambda_{si})t} \right], \quad (2)$$

$$q_{si}(t) = \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{oi} + \lambda_{si}} \cdot \left[1 - e^{-(\lambda_{oi} + \lambda_{si})t} \right], \quad (3)$$

где λ_{oi} , λ_{si} – постоянные интенсивности отказов i -того элемента при учете его отказов «обрыв цепи» и отказов в срабатывании, соответственно; t – текущее время работы i -того элемента системы.

Под простой по структуре схемой замещения исходной системы будем понимать такую схему,

элементы которой могут соединяться 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 ее входом и выходом.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{oi} , то вероятность разрыва связи между точками входа и выхода Q_o определим следующим образом:

$$Q_o = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_{oi}). \quad (4)$$

Если у каждого из n логически последовательно соединенных элементов произойдет отказ в срабатывании в каждом из i элементов, то это приведет к тому, что между точками входа и выхода схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{si} , то вероятность Q_s того, что между точками входа и выхода схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток, определим с помощью формулы:

$$Q_s = \prod_{i=1}^n q_{si}. \quad (5)$$

Для простой по определению схемы замещения системы, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, отказ типа обрыв цепи в каждом из j ($j = \overline{1, m}$) элементов приводит к обрыву связи между точками входа и выхода.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{oj} , то вероятность Q_o того, что произойдет разрыв связи между точками входа и выхода, определим с помощью формулы:

$$Q_o = \prod_{j=1}^m q_{oj}. \quad (6)$$

В случае, если у любого из m логически параллельно соединенных элементов произойдет отказ в срабатывании, это приведет к тому, что между точками «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов q_{si} ($j = \overline{1, m}$)

элементов схемы замещения, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, тогда Q_s – вероятность того, что между точками входа и выхода схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток, найдем, используя формулу:

$$Q_s = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - q_{sj}). \quad (7)$$

Чтобы сложную схему замещения системы электроснабжения привести к простой по определению, следует использовать способ переходов от логического треугольника к эквивалентной по надежности звезде либо использовать способ переходов от логической звезды к эквивалентному по надежности логическому треугольнику (рис. 1а, б).

Точные формулы переходов от логического треугольника к эквивалентной по надежности звезде и от логической звезды к эквивалентному по надежности логическому треугольнику приведены в [8,9].

Пусть каждый элемент логического треугольника, обозначим их символами x, y, z (см. рис. 1а), характеризуется вероятностями $P_{ox}, q_{sx}; P_{oy}, q_{sy}; P_{oz}, q_{sz}$, а элементы i, j, k логической звезды – вероятностями $P_{oi}, q_{si}; P_{oj}, q_{sj}; P_{ok}, q_{sk}$ (см. рис. 1б).

Сущность преобразования логического треугольника в эквивалентную по надежности логическую звезду заключается в том, что соединение (см. рис. 1а) заменяется эквивалентным по надежности соединением в виде (см. рис. 1б).

Если заданы параметры надежности элементов логического треугольника P_{ox}, P_{oy}, P_{oz} и q_{sx}, q_{sy}, q_{sz} , то эквивалентные по надежности параметры звезды P_{oi}, P_{oj}, P_{ok} и q_{si}, q_{sj}, q_{sk} находим, пользуясь формулами [8]:

$$P_{oi} = \left\{ \frac{[1 - (1 - P_{ox}) \cdot (1 - P_{oy} \cdot P_{oz})] \cdot [1 - (1 - P_{oy}) \cdot (1 - P_{ox} \cdot P_{oz})]}{[1 - (1 - P_{oz}) \cdot (1 - P_{ox} \cdot P_{oy})]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

$$P_{oj} = \left\{ \frac{[1 - (1 - P_{oy}) \cdot (1 - P_{ox} \cdot P_{oz})] \cdot [1 - (1 - P_{oz}) \cdot (1 - P_{ox} \cdot P_{oy})]}{[1 - (1 - P_{ox}) \cdot (1 - P_{oy} \cdot P_{oz})]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

$$P_{ok} = \left\{ \frac{[1 - (1 - P_{oz}) \cdot (1 - P_{ox} \cdot P_{oy})] \cdot [1 - (1 - P_{ox}) \cdot (1 - P_{oy} \cdot P_{oz})]}{[1 - (1 - P_{oy}) \cdot (1 - P_{ox} \cdot P_{oz})]} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Отсюда:

$$q_{oi} = 1 - P_{oi}, \quad q_{oj} = 1 - P_{oj}, \quad q_{ok} = 1 - P_{ok}.$$

$$q_{si} = \left\{ \frac{[1 - (1 - q_{sz} \cdot q_{sy}) \cdot (1 - q_{sx})] \cdot [1 - (1 - q_{sx} \cdot q_{sz}) \cdot (1 - q_{sy})]}{[1 - (1 - q_{sx} \cdot q_{sy}) \cdot (1 - q_{sz})]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

$$q_{sj} = \left\{ \frac{[1 - (1 - q_{sx} \cdot q_{sz}) \cdot (1 - q_{sy})] \cdot [1 - (1 - q_{sx} \cdot q_{sy}) \cdot (1 - q_{sz})]}{[1 - (1 - q_{sz} \cdot q_{sy}) \cdot (1 - q_{sx})]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

$$q_{sk} = \left\{ \frac{[1 - (1 - q_{sx} \cdot q_{sy}) \cdot (1 - q_{sz})] \cdot [1 - (1 - q_{sz} \cdot q_{sy}) \cdot (1 - q_{sx})]}{[1 - (1 - q_{sx} \cdot q_{sz}) \cdot (1 - q_{sy})]} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

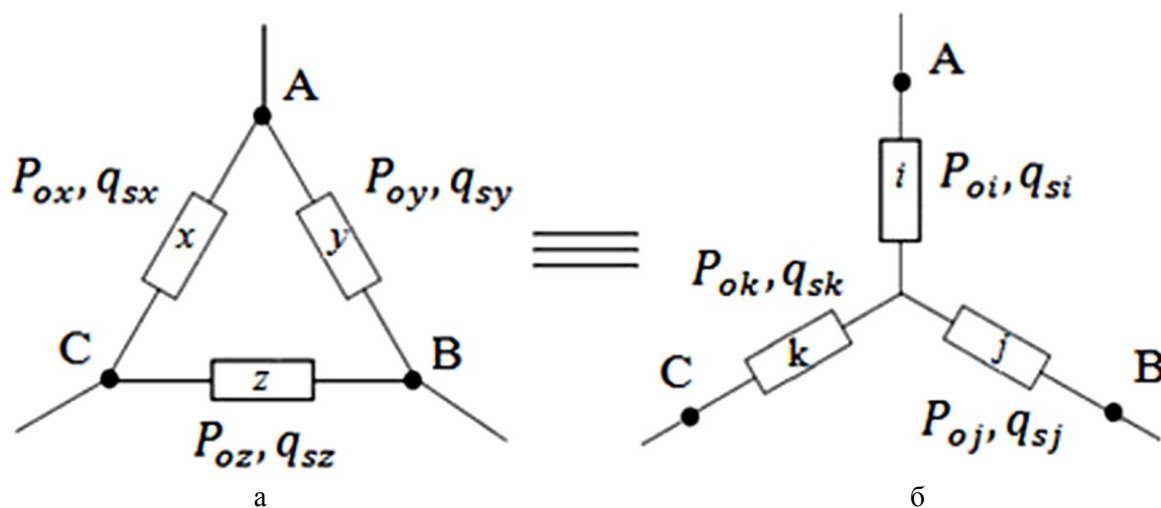


Рис. 1. Логическое соединение элементов в виде:
 а – треугольника; б – звезды

Для высоконадежных систем, для которых соблюдается условие:

$$\begin{aligned}
 q_{oi} \cdot q_{ok} &\leq 0,01, & q_{oi} \cdot q_{oj} &\leq 0,01, \\
 q_{ok} \cdot q_{oj} &\leq 0,01, & q_{ox} \cdot q_{oy} \cdot q_{oz} &\leq 0,001, \\
 q_{sy} \cdot q_{sz} &\leq 0,01, & q_{sx} \cdot q_{sz} &\leq 0,01, \\
 q_{sx} \cdot q_{sy} &\leq 0,01, & q_{sx} \cdot q_{sy} \cdot q_{sz} &\leq 0,001,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

этим произведениями можно пренебречь, тогда формулы (8)-(13) примут вид:

$$\tilde{P}_{oi} = 1 - (1 - P_{ox})(1 - P_{oy}), \tag{15}$$

$$\tilde{P}_{oj} = 1 - (1 - P_{oy})(1 - P_{oz}), \tag{16}$$

$$\tilde{P}_{ok} = 1 - (1 - P_{ox})(1 - P_{oz}), \tag{17}$$

$$\tilde{q}_{si} = \left[\frac{q_{sx} \cdot q_{sy}}{q_{sz}} \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{18}$$

$$\tilde{q}_{sj} = \left[\frac{q_{sy} \cdot q_{sz}}{q_{sx}} \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{19}$$

$$\tilde{q}_{sk} = \left[\frac{q_{sx} \cdot q_{sz}}{q_{sy}} \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{20}$$

Формулы (8)-(13) и (15)-(20) позволяют логический треугольник заменить эквивалентной по надежности звездой, используя точные и приближенные формулы.

Если заданы параметры надежности элементов логической звезды (см. рис. 1б): $P_{oi}, q_{si}; P_{oj}, q_{sj}; P_{ok}, q_{sk}$, то эквивалентные по надежности элементы треугольника $P_{ox}, q_{sx}; P_{oy}, q_{sy}; P_{oz}, q_{sz}$ (см. рис. 1а) найдем, пользуясь формулами [9]:

$$q_{ox} = \frac{2}{[2 \cdot q_{oj} + q_{oi} \cdot q_{ok} - q_{oj} \cdot (q_{oi} + q_{ok})] \cdot \gamma + 1}, \tag{21}$$

$$q_{oy} = \frac{2}{[2 \cdot q_{ok} + q_{oi} \cdot q_{oj} - q_{ok} \cdot (q_{oi} + q_{oj})] \cdot \gamma + 1}, \tag{22}$$

$$q_{oz} = \frac{2}{[2 \cdot q_{oi} + q_{oj} \cdot q_{ok} - q_{oi} \cdot (q_{oj} + q_{ok})] \cdot \gamma + 1}. \tag{23}$$

Отсюда:

$$P_{ox} = 1 - q_{ox}, \quad P_{oy} = 1 - q_{oy}, \quad P_{oz} = 1 - q_{oz}.$$

Параметр γ в формулах (21)-(23) находится из решения кубического уравнения вида:

$$\gamma^3 + \alpha_1 \gamma^2 + \alpha_2 \gamma + \alpha_3 = 0, \tag{24}$$

где

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \frac{1}{b+c} + \frac{1}{a} + \frac{1}{a+b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{a+c} + \frac{1}{b}, \\
 \alpha_2 &= \frac{a+b+c-8}{(b+c-a) \cdot (a+b-c) \cdot (a+c-b)}, \tag{25}
 \end{aligned}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{(b+c-a) \cdot (a+b-c) \cdot (a+c-b)},$$

где

$$\begin{aligned} a &= q_{oi} + q_{ok} - q_{oi} \cdot q_{ok}, \\ b &= q_{oi} + q_{oj} - q_{oi} \cdot q_{oj}, \\ c &= q_{oj} + q_{ok} - q_{oj} \cdot q_{ok}. \end{aligned} \quad (26)$$

В кубическом уравнении (24) производится замена [11]:

$$\gamma = Y - \frac{\alpha_1}{3}. \quad (27)$$

Уравнение (24) примет вид:

$$Y^3 + \alpha_4 Y^2 + \alpha_5 = 0, \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= -\frac{\alpha_1^2}{3} + \alpha_2, \\ \alpha_5 &= 2\left(\frac{\alpha_1}{3}\right)^3 - \frac{\alpha_1 \alpha_2}{3} + \alpha_3, \\ \alpha_6 &= \left(\frac{\alpha_4}{3}\right)^3 + \left(\frac{\alpha_5}{2}\right)^2, \end{aligned}$$

а) если $\alpha_6 < 0, \alpha_4 < 0$, тогда:

$$Y_1 = 2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}} \cos \frac{\alpha}{3}, \quad (29)$$

$$Y_2 = -2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (30)$$

$$Y_3 = -2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (31)$$

$$\cos \alpha = -\frac{\alpha_5}{2 \cdot \sqrt{\left[-\left(\frac{\alpha_4}{3}\right)\right]^3}},$$

б) если $\alpha_6 \geq 0, \alpha_4 < 0$, тогда:

$$Y_1 = -2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}} \operatorname{cosec} 2\alpha, \quad (32)$$

$$Y_2 = \sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}} (\operatorname{cosec} 2\alpha + i\sqrt{3} \operatorname{ctg} 2\alpha), \quad (33)$$

$$Y_3 = \sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}} (\operatorname{cosec} 2\alpha - i\sqrt{3} \operatorname{ctg} 2\alpha), \quad (34)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt[3]{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}, \quad \left(|\alpha| \leq \frac{\pi}{4}\right),$$

$$\sin \beta = \frac{2}{\alpha_5} \sqrt{\left(-\frac{\alpha_4}{3}\right)^3}, \quad \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2}\right).$$

с) если $\alpha_6 \geq 0, \alpha_4 > 0$, тогда:

$$Y_1 = -2\sqrt{\frac{\alpha_4}{3}} \operatorname{ctg} 2\alpha, \quad (35)$$

$$Y_2 = \sqrt{\frac{\alpha_4}{3}} (\operatorname{ctg} 2\alpha - i\sqrt{3} \operatorname{cosec} 2\alpha), \quad (36)$$

$$Y_3 = \sqrt{\frac{\alpha_4}{3}} (\operatorname{ctg} 2\alpha + i\sqrt{3} \operatorname{cosec} 2\alpha), \quad (37)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt[3]{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}, \quad \left(|\alpha| \leq \frac{\pi}{4}\right),$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2}{\alpha_5} \sqrt{\left(\frac{\alpha_4}{3}\right)^3}, \quad \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2}\right).$$

Подставляя найденные значения: Y_1, Y_2, Y_3 в формулу (27), получим:

$$\gamma_1 = Y_1 - \frac{\alpha_1}{3}, \quad (38)$$

$$\gamma_2 = Y_2 - \frac{\alpha_1}{3}, \quad (39)$$

$$\gamma_3 = Y_3 - \frac{\alpha_1}{3}. \quad (40)$$

Подставляются поочередно найденные корни $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ в формулы (21)-(23) и выбирается тот корень, для которого выполняется условие:

$$0 < q_{ox} < 1; \quad 0 < q_{oy} < 1; \quad 0 < q_{oz} < 1. \quad (41)$$

Формулы переходов от соединения в виде звезды к эквивалентному по надежности соединению в виде треугольника, при учете отказов элементов типа отказ в срабатывании, примут вид:

$$q_{sx} = 1 - \frac{2}{[2P_{sj} + P_{si} \cdot P_{sk} - P_{sj}(P_{si} + P_{sk})] \cdot \gamma + 1}, \quad (42)$$

$$q_{sy} = 1 - \frac{2}{[2P_{sk} + P_{si} \cdot P_{sj} - P_{sk}(P_{si} + P_{sj})] \cdot \gamma + 1}, \quad (43)$$

$$q_{sz} = 1 - \frac{2}{[2P_{si} + P_{sj} \cdot P_{sk} - P_{si}(P_{sj} + P_{sk})] \cdot \gamma + 1}. \quad (44)$$

Значение корней кубического уравнения (24) $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ находим из его решения.

Коэффициенты кубического уравнения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ находятся с помощью формул (25), а коэффициенты a, b и c определяются по формулам:

$$\begin{aligned} a &= P_{si} + P_{sk} - P_{si} \cdot P_{sk}, \\ b &= P_{si} + P_{sj} - P_{si} \cdot P_{sj}, \\ c &= P_{sj} + P_{sk} - P_{sj} \cdot P_{sk}. \end{aligned} \quad (45)$$

Выбирается то значение корня, при котором:

$$0 < q_{sx} < 1, \quad 0 < q_{sy} < 1, \quad 0 < q_{sz} < 1. \quad (46)$$

Для высоконадежных систем, если выполняется условие (14), то формулы (21)-(23) и (42)-(44) переходов от логической звезды к эквивалентному по надежности соединению в виде треугольника примут вид:

$$\tilde{q}_{ox} = \left[\frac{q_{oi} \cdot q_{ok}}{q_{oj}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (47)$$

$$\tilde{q}_{oy} = \left[\frac{q_{oi} \cdot q_{oj}}{q_{ok}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (48)$$

$$\tilde{q}_{oz} = \left[\frac{q_{ok} \cdot q_{oj}}{q_{oi}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (49)$$

$$\tilde{q}_{sx} = q_{si} \cdot q_{sk}, \quad (50)$$

$$\tilde{q}_{sy} = q_{si} \cdot q_{sj}, \quad (51)$$

$$\tilde{q}_{sz} = q_{sx} \cdot q_{sj}. \quad (52)$$

Формулы (21)-(23), (42)-(44) и (47)-(52) позволяют логическую звезду заменить эквивалентным по надежности логическим треугольником, используя точные и приближенные формулы.

Для невозстанавливаемой системы справедлива формула [8]:

$$R = R_o - Q_s, \quad (53)$$

где R – вероятность того, что в течение времени t не произойдет разрыв связи и не пройдет сквозной аварийный ток между точками «вход» и «выход» схемы замещения; R_o – вероятность того, что в течение времени t не произойдет разрыв связи между точками «вход» и «выход» схемы замещения; Q_s – вероятность того, что в течение времени t между точками «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Пример. Для схемы замещения системы (рис. 2), заданы вероятности отказов ее элементов для $t=0,1$ года.

$$\begin{aligned} q_{o1} &= 0,0482, & q_{o2} &= 0,0405, \\ q_{o3} &= 0,0557, & q_{o4} &= 0,0637, \\ q_{o5} &= 0,0717, & q_{o6} &= 0,0786, \\ q_{o7} &= 0,0855, & q_{o8} &= 0,0401, \\ q_{o9} &= 0,0245, & q_{o10} &= 0,0714, \\ q_{o11} &= 0,0557, & q_{o12} &= 0,0478, \\ q_{o13} &= 0,0790, & q_{o14} &= 0,0858, \\ q_{s1} &= 0,0241, & q_{s2} &= 0,0162, \\ q_{s3} &= 0,0318, & q_{s4} &= 0,0239, \\ q_{s5} &= 0,0159, & q_{s6} &= 0,0315, \\ q_{s7} &= 0,0466, & q_{s8} &= 0,0321, \\ q_{s9} &= 0,0163, & q_{s10} &= 0,0238, \\ q_{s11} &= 0,0318, & q_{s12} &= 0,0398, \\ q_{s13} &= 0,0237, & q_{s14} &= 0,039. \end{aligned}$$

Определить вероятность R того, что в течение времени $t=0,1$ года не произойдет разрыв связи и не пройдет сквозной аварийный ток между точками «вход» и «выход» схемы замещения (см. рис. 2).

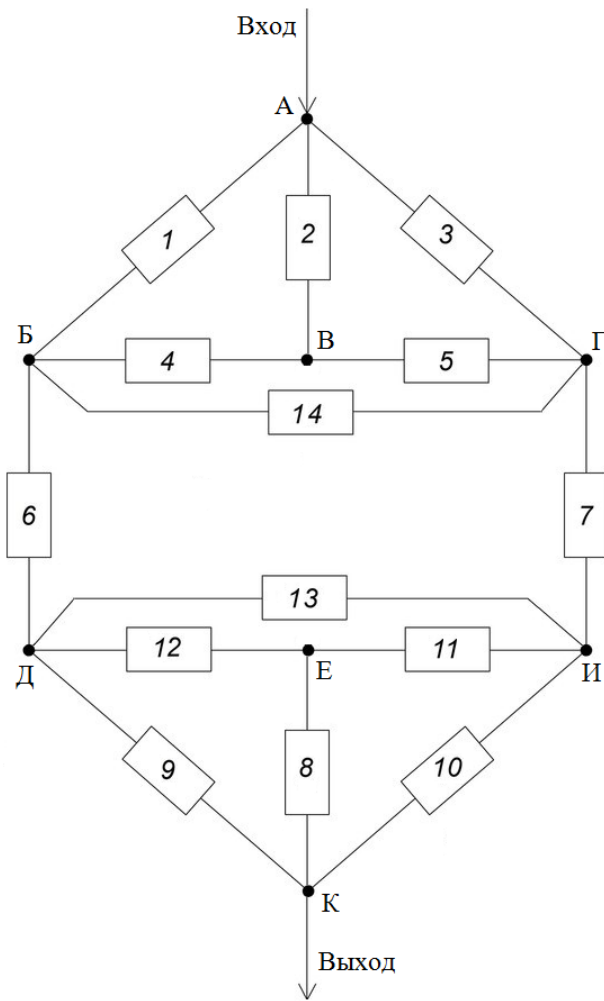


Рис. 2. Схема замещения системы

Решение. Используя исходные данные примера, схему замещения (см. рис. 2), точные формулы (21)-(23) и (42)-(44) переходов от логической звезды АБВГ к эквивалентному по надежности треугольнику АБГ, находим эквивалентные вероятности отказов элементов треугольника:

$$q_{o21} = 0,2080, \quad q_{o22} = 0,2309, \quad q_{o23} = 0,3346, \\ q_{s21} = 0,0004, \quad q_{s22} = 0,0003, \quad q_{s23} = 0,0004$$

Используя приближенные формулы (47)-(52) переходов от логической звезды АБВГ к эквивалентному по надежности треугольнику АБГ, находим:

$$\tilde{q}_{o21} = 0,1897, \quad \tilde{q}_{o22} = 0,2134, \quad \tilde{q}_{o23} = 0,3358, \\ \tilde{q}_{s21} = 0,0004, \quad \tilde{q}_{s22} = 0,0003, \quad \tilde{q}_{s23} = 0,0004.$$

Логическую звезду КДЕИ заменим эквивалентным по надежности треугольником (рис. 3а), используя точные и приближенные формулы, тогда эквивалентные вероятности от-

казов логического треугольника примут следующие значения:

$$q_{o24} = 0,2642, \quad q_{o25} = 0,1990, \quad q_{o26} = 0,2280, \\ q_{s24} = 0,0001, \quad q_{s25} = 0,1855, \quad q_{s26} = 0,001, \\ \tilde{q}_{o24} = 0,2576, \quad \tilde{q}_{o25} = 0,1855, \quad \tilde{q}_{o26} = 0,2164, \\ \tilde{q}_{s24} = 0,0013, \quad \tilde{q}_{s25} = 0,0013, \quad \tilde{q}_{s26} = 0,001.$$

Используя формулы (6,7), параллельно соединенные элементы 1 и 21; 3 и 22; 12 и 23; 13 и 24; 10 и 26; 9 и 25 схемы замещения (см. рис. 3а), заменим эквивалентными 31, 32, 33, 34, 35, 36 (см. рис. 3б), соответственно.

Эквивалентные вероятности отказов элементов будут иметь следующие значения:

$$q_{o31} = 0,0100, \quad q_{o32} = 0,0129, \quad q_{o33} = 0,0287, \\ q_{s31} = 0,0245, \quad q_{s32} = 0,0321, \quad q_{s33} = 0,0394, \\ \tilde{q}_{o31} = 0,0091, \quad \tilde{q}_{o32} = 0,0119, \quad \tilde{q}_{o33} = 0,0288, \\ \tilde{q}_{s31} = 0,0245, \quad \tilde{q}_{s32} = 0,0321, \quad \tilde{q}_{s33} = 0,0394, \\ q_{o34} = 0,0209, \quad q_{o35} = 0,0049, \quad q_{o36} = 0,0163, \\ q_{s34} = 0,0249, \quad q_{s35} = 0,0176, \quad q_{s36} = 0,0248, \\ \tilde{q}_{o34} = 0,0203, \quad \tilde{q}_{o35} = 0,0045, \quad \tilde{q}_{o36} = 0,0154, \\ \tilde{q}_{s34} = 0,0249, \quad \tilde{q}_{s35} = 0,0176, \quad \tilde{q}_{s36} = 0,0248.$$

Логический треугольник АБГ (см. рис. 3б) заменим эквивалентной по надежности звездой, используя точные (8)-(13) и приближенные формулы (15)-(20), тогда эквивалентные вероятности безотказной работы элементов, при учете отказов типа обрыв цепи и вероятности отказов при учете отказов в срабатывании будут иметь следующие значения:

$$P_{o41} = 0,9998, \quad P_{o42} = 0,9997, \quad P_{o43} = 0,9996, \\ q_{s41} = 0,1454, \quad q_{s42} = 0,1767, \quad q_{s43} = 0,2271, \\ \tilde{P}_{o41} = 0,9998, \quad \tilde{P}_{o42} = 0,9997, \quad \tilde{P}_{o43} = 0,9996, \\ \tilde{q}_{s41} = 0,1412, \quad \tilde{q}_{s42} = 0,1732, \quad \tilde{q}_{s43} = 0,2273.$$

Логический треугольник ДИК заменим эквивалентной по надежности звездой (см. рис. 3б), используя точные и приближенные формулы:

$$P_{o44} = 0,9999, \quad P_{o45} = 0,9997, \quad P_{o46} = 0,9999, \\ q_{s44} = 0,1352, \quad q_{s45} = 0,1875, \quad q_{s46} = 0,1345, \\ \tilde{P}_{o44} = 0,9999, \quad \tilde{P}_{o45} = 0,9997, \quad \tilde{P}_{o46} = 0,9999, \\ \tilde{q}_{s44} = 0,1330, \quad \tilde{q}_{s45} = 0,1875, \quad \tilde{q}_{s46} = 0,1322.$$

Используя схему замещения (см. рис. 3в), находим:

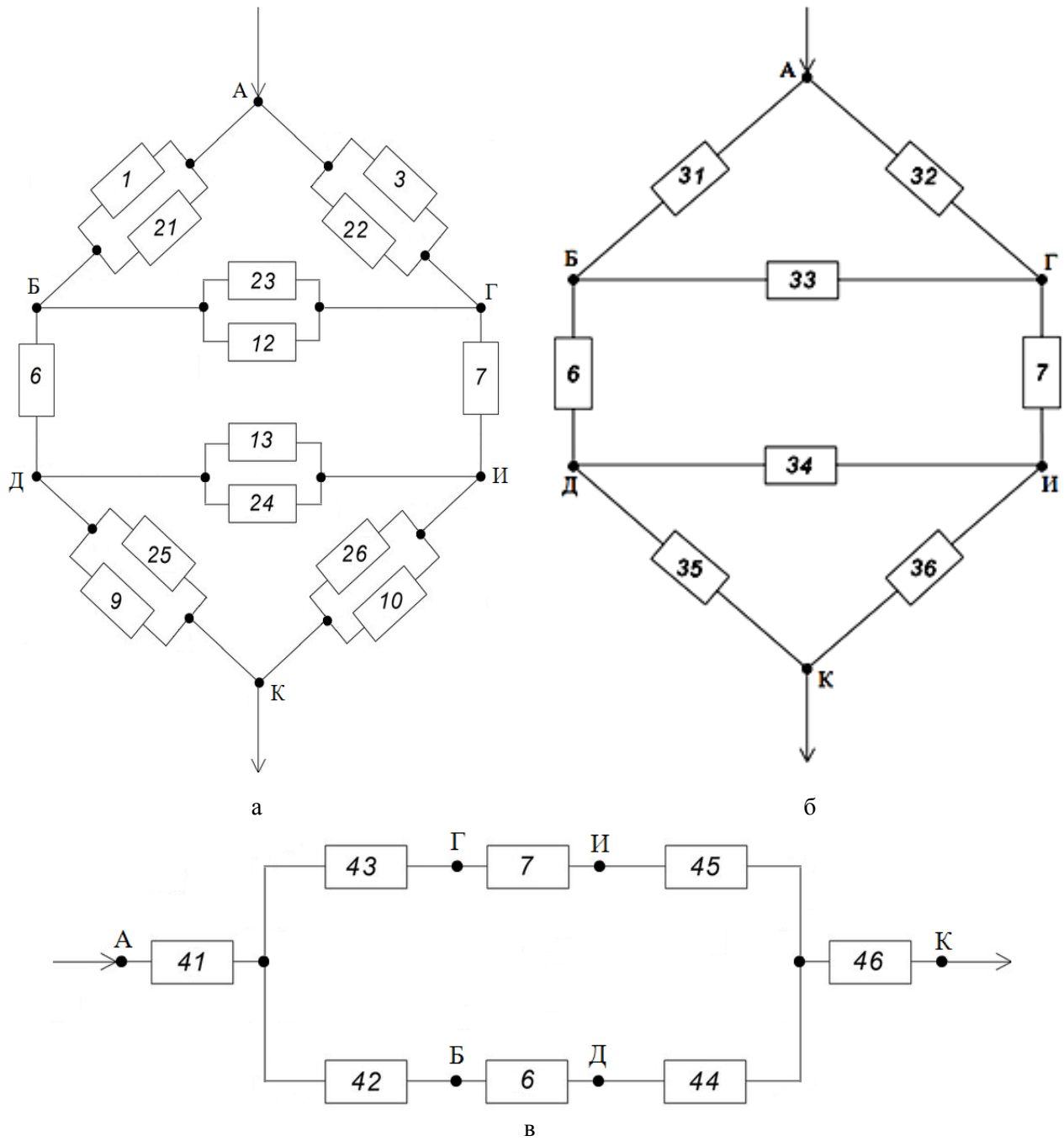


Рис. 3. Способ преобразования схемы замещения системы

$$R_o = P_{o41}P_{o46}[1 - (1 - P_{o43}P_{o7}P_{o45})(1 - P_{o42}P_{o6}P_{o44})] = 0,9998 \cdot 0,9999[1 - (1 - 0,9996 \cdot 0,9145 \cdot 0,9997)(1 - 0,9997 \cdot 0,9213 \cdot 0,9999)] = 0,9929,$$

$$\tilde{R}_o = \tilde{P}_{o41}\tilde{P}_{o46}[1 - (1 - \tilde{P}_{o43}P_{o7}\tilde{P}_{o45})(1 - \tilde{P}_{o42}P_{o6}\tilde{P}_{o44})] = 0,9998 \cdot 0,9999[1 - (1 - 0,9996 \cdot 0,9145 \cdot 0,9997)(1 - 0,9997 \cdot 0,9213 \cdot 0,9999)] = 0,9929,$$

$$Q_s = q_{s41}q_{s46}[1 - (1 - q_{s43}q_{s7}q_{s45})(1 - q_{s42}q_{s6}q_{s44})] = 0,1454 \cdot 0,1345[1 - (1 - 0,2271 \cdot 0,0466 \cdot 0,1875)(1 - 0,1767 \cdot 0,0315 \cdot 0,1352)] = 0,00005,$$

$$\tilde{Q}_s = \tilde{q}_{s41}\tilde{q}_{s46}[1 - (1 - \tilde{q}_{s43}q_{s7}\tilde{q}_{s45})(1 - \tilde{q}_{s42}q_{s6}\tilde{q}_{s44})] = 0,1412 \cdot 0,1322[1 - (1 - 0,2273 \cdot 0,0466 \cdot 0,1875)(1 - 0,1732 \cdot 0,0315 \cdot 0,1330)] = 0,00005.$$

Используя формулу (53), находим:

$$R = R_o - Q_s = 0,9929 - 0,00005 = 0,99285,$$

$$\tilde{R} = \tilde{R}_o - \tilde{Q}_s = 0,9929 - 0,00005 = 0,99285.$$

Из анализа полученных результатов видно, что использование точного и приближенного методов преобразования логического треугольника в эквивалентную по надежности логическую звезду и логической звезды в эквивалентный по надежности треугольник для высоконадежной системы, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, дало одинаковый результат.

Выводы

1. Предложена методика оценки надежности сложных по структуре систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

2. Предлагаемую методику целесообразно использовать для случая, когда $q_{oi} \leq 0,1$ и $q_{si} \leq 0,1$ где $i = \overline{1, n}$.

Список литературы

1. Козлов, Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.С. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975. – 472 с.
2. Ковалев, А.П. Метод расчета надежности сложных систем электроснабжения с учетом восстановления элементов / А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Электричество. – 1985. – №10. – С. 52-53.
3. Рябинин, И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем / И.А. Рябинин. – 2-е изд. – Л.: Судостроение, 1971. – 456 с.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т.5: Проектный анализ надежности. – М.: Машиностроение, 1988. – 316 с.
5. Рябинин, И.А. Логико-вероятностная теория безопасности технических систем / И.А. Рябинин, Ю.М. Парфенов, О.Д. Цыпин // Электричество. – 1994. – №7. – С. 35-40.
6. Разгильдеев, И.А. О надежности систем электроснабжения угольных шахт / И.А. Разгильдеев, А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Уголь Украины. – 1985. – №1. – С. 18-22.
7. Ковалев, А.П. Применение логико-вероятностных методов для оценки надежно-

- сти структурно сложных схем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – 2000. – №9. – С. 66-70.
8. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
9. Ковалев, А.П. О преобразовании «звездотреугольник» при расчетах надежности сложных по структуре схем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – 1989. – №10. – С. 70-74.
10. Кулик, Б.А. Логико-вероятностные методы и алгебра кортежей: В сб. «Теория, информационная техника моделирования безотказности сложных систем». – Санкт-Петербург: ИПМАШРАН, Препринт 123. Вып.1995. – 5 с.
11. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 544 с.
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. Iss.4. – 2001. – P. 17-19.
13. Billinton, R. Reliability Evaluation of Power Systems / R. Billinton, R. N. Allan. // New York Plenum Press, 1986. – 540 p.
14. Singh, C. System Reliability Modeling and Evaluation / C. Singh, R. Billinton. – London: Hutchinson Educational, 1977. – 248 p.
15. Конесев, С.Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем [Электронный ресурс] / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru>
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, 24-25 мая 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.I. Voronin, A.S. Petrenko
 Donetsk National Technical University (Donetsk)

**RELIABILITY CALCULATION OF STRUCTURALLY
 COMPLEX NONRECOVERABLE SYSTEMS, THE ELEMENTS OF WHICH
 MAY BE IN THREE INCOMPATIBLE STATES**

Background. For highly reliable nonrecoverable systems, the elements of which may be in three incompatible states (operable; failure of the open circuit type; failure to trigger) using the transformation of "triangle-star" and "star-triangle" the method of reliability calculations proposed, which differs from the known ones in the obtained simplified formulas of transitions "triangle-star" and "star-triangle", which significantly reduced the volume and complexity of calculations. The accuracy of calculations according to the proposed method is not inferior to the existing tested methods (see calculation example).

Materials and/or methods. Using exact formulas of transformation of the logical triangle into the equivalently reliable star and the formula of transitions from the logical star to the equivalently reliable triangle for nonrecoverable structurally complex systems, the elements of which can be in three incompatible states, and if the condition met ($q_{oi} \leq 0,1$; $q_{st} \leq 0,1$), the simplified formulas of transitions "triangle – star" and "star – triangle" obtained which were the development basis of engineering methods of reliability calculations of highly reliable systems.

Results The use in highly reliable systems of the proposed simplified formulas of transitions from a logical triangle to the equivalently reliable star and the formula of transitions from a logical star to equivalently reliable triangle, taking into account two incompatible types of failures of system components, an engineering method for calculation of system reliability obtained with consideration of the open circuit type failure and type of failures in operation of protection means.

Conclusion. The end result of this work is the proposed method of assessment of the reliability of non-recoverable structurally complex systems, the elements of which may be incompatible in three states (operable; failure of the open circuit type; failure to trigger). The example of calculations is given.

Keywords: reliability, system, complex structure, bridge structure, triangle, star, the probability of failure, open circuit type failure, failure to trigger, the probability of trouble-free operation.

Сведения об авторах

А.П. Ковалев

Телефон: +380 (95) 671-37-28

Эл. почта: AbrecAP@mail.ru

А.С. Петренко

Телефон: +380 (95) 850-50-95

Эл. почта: andreyskiff@gmail.com

Д.И. Воронин

Телефон: +380 (66) 802-78-79

Эл. почта: den9.sport@mail.ru

Статья поступила 20.12.2017 г.

© А.П. Ковалев, Д.И. Воронин, А.С. Петренко, 2018

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