# О преобразовании «звезда—треугольник» при расчетах надежности сложных по структуре схем

КОВАЛЕВ А.П., СПИВАКОВСКИЙ А.В.

*Предложены точные формулы перехода от соединения элементов в виде «звезда» к эквивалентному по надежности соединению в виде «треугольник». Это позволило значительно расширить область применения преобразований «звезда—треугольник» в расчетах надежности сложных по структуре схем, элементы которых могут находиться в трех состояниях. Приведен пример расчета.*

Ключевые слова: *сложная система, надежность, обрыв цепи, короткое замыкание, вероятность отказов, расчеты*

*Exact formulae for change from the star-connection of elements to the equally reliable delta-connection are proposed. This makes it possible to extend considerably the area of application of transformations «delta—star» in the reliability analysis of structurally complex circuits whose elements can be in three states. An example of calculation is given.*

Key words: *complex system, reliability, circuit break, short circuit, failure probability, calculations*

К невосстанавливаемым в процессе эксплуатации системам будем относить также системы, восстановление которых по каким-либо причинам невозможно непосредственно в рассматриваемый период времени [1]. Методики оценки надежности невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в двух состояниях: работоспособное и отказавшее (отказ типа «обрыв цепи»), разработаны в полной мере и нашли применение в промышленности [2—7].

В тех случаях, если необходимо повысить надежность проектируемой системы без изменения надежности комплектующих ее элементов, обычно вводятся избыточные (резервные) элементы или группы элементов. Для систем, состоящих из элементов, которые могут находиться в трех состояниях, введение избыточных элементов с тремя состояниями может не только не увеличить надежность схемы, но даже ее снизить. Все будет зависеть от соотношения между различными видами отказов элемента, конфигурации системы и числа резервных элементов. Для большинства электрических элементов можно выделить предельные случаи возможных внезапных отказов, а именно: обрыв цепи и короткое замыкание. Так, в конденсаторе обрыв проводников, припаянных к обкладкам, уменьшает емкость до нуля (отказ типа «обрыв цепи»), или при увеличении токов утечки больше допустимого, происходит пробой конденсатора (отказ типа «короткое замыкание»). Отказы диода можно также разделить на два вида: отказы в диоде, приводящие к обрыву цепи (отказ типа «обрыв цепи») и короткому замыканию в самом диоде (отказ типа «короткого замыкания»), и т.д.

Для релейно-контактных элементов различного вида и бесконтактных реле обрыв и короткое замыкание являются не предельными, а единственно возможными видами неработоспособных состояний [8].

Элементы с тремя состояниями можно выделить и в других неэлектрических системах, например: пожарные водопроводы, воздухоподающие трубопроводы, газопроводы и т.д. Аналогами элементов с тремя состояниями в таких системах могут быть: краны, вентили различных типов, запорная арматура, заглушки и другие прерыватели потока, для которых в неработоспособном состоянии поток не прерывается («короткое замыкание»), или не передается («обрыв цепи»).

Предположим, что все элементы, входящие в систему, могут отказывать независимо друг от друга; элементы, из которых состоит рассматриваемая система, могут находиться в трех состояниях: работоспособном, неработоспособном — отказ типа «обрыв цепи», неработоспособном — отказ типа «короткое замыкание»; отказ элемента типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» — события несовместимые; потоки отказов типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» простейшие; пропускная способность элементов неограничена.

Обозначим через $p_i$ вероятность безотказной работы $i$-го элемента, $q_{oi}$ — вероятность появления отказа в $i$-м элементе типа «обрыв цепи», а через $q_{si}$ — вероятность появления отказа в $i$-м элементе типа «короткое замыкание»; эти три состояния составляют полную группу событий:

$$p_i + q_{si} + q_{oi} = 1\,. \qquad (1)$$

В системах, состоящих из $n$ последовательно соединенных элементов, отказ типа «обрыв цепи» в каком-либо из $i$ элементов приводит к отказу всей схемы, в то время как в случае отказа типа «короткое замыкание в $i$-м элементе должны выходить из строя все последовательно соединенные элементы.

Выход из строя системы, состоящей из $m$ параллельно соединенных элементов, наступит в том случае, когда в каждом из $j$ параллельно соединенных элементов произойдет отказ типа «обрыв цепи» либо в одном из параллельно соединенных элементов произойдет отказ типа «короткое замыкание».

Вероятность безотказной работы $R_n$ и $R_m$ соответственно для $n$ последовательного и $m$ параллельного соединения элементов определяется следующим образом [9]:

$$R_n = \prod_{i=1}^{n}(1 - q_{oi}) - \prod_{i=1}^{n} q_{si}; \tag{2}$$

$$R_m = \prod_{j=1}^{m}(1 - q_{sj}) - \prod_{j=1}^{m} q_{oj}. \tag{3}$$

Вероятность системного отказа типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» при $n$ последовательном и $m$ параллельном соединении элементов вычисляется по формулам:

$$Q_{on} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - q_{oi}); \tag{4}$$

$$Q_{sn} = \prod_{i=1}^{n} q_{si}; \tag{5}$$

$$Q_{om} = \prod_{j=1}^{m} q_{oj}; \tag{6}$$

$$Q_{sm} = 1 - \prod_{j=1}^{m}(1 - q_{sj}). \tag{7}$$

Схемы технических систем не всегда состоят из последовательного, параллельного или смешанного соединения элементов, которые могут находиться в трех состояниях, существуют и более сложные схемы соединений элементов. В них элементы соединены таким образом, что непосредственное определение эквивалентных вероятностей безотказной работы с использованием только формул (2)—(7) невозможно.

Под сложной схемой соединений элементов будем понимать такую схему, в состав которой входит хотя бы одна группа элементов, имеющих мостиковую схемы [2, 10]. Для приведения таких схем к структурам, состоящим из смешанного соединения элементов, используют способ преобразования «звезда—треугольник» (рис. 1,*а*, *б*) [11]:

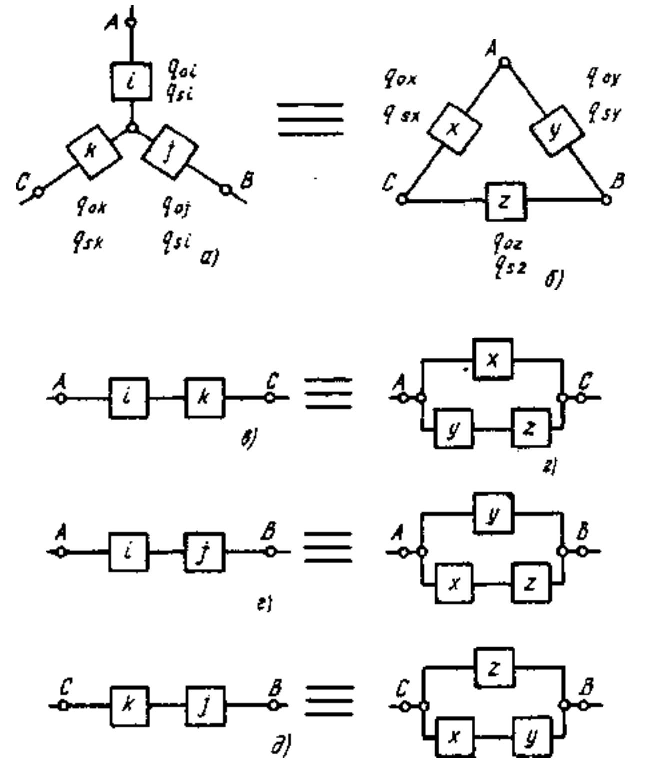

Рис. 1. Преобразование соединений элементов в виде «звезды» в эквивалентное по надежности соединение в виде «треугольника» для двух видов отказов элементов: «обрыв цепи» и «короткое замыкание»

$$\left.\begin{aligned} q_{oi} &= 1 - \sqrt{\frac{q_{o1}\,q_{o2}}{q_{o3}}}; \\ q_{oj} &= 1 - \sqrt{\frac{q_{o2}\,q_{o3}}{q_{o1}}}; \\ q_{ok} &= 1 - \sqrt{\frac{q_{o3}\,q_{o1}}{q_{o2}}}, \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

где

$$q_{o1} = 1 - [1 - (1 - q_{oz})(1 - q_{oy})]\, q_{ox};$$

$$q_{o2} = 1 - [1 - (1 - q_{ox})(1 - q_{oz})]\, q_{oy};$$

$$q_{o3} = 1 - [1 - (1 - q_{ox})(1 - q_{oy})]\, q_{oz}.$$

Формулы переходов от «треугольника» к эквивалентной по надежности «звезде» с учетом только отказов типа «короткое замыкание» имеют вид [11]:

$$\left.\begin{aligned} q_{si} &= 1 - \sqrt{\frac{q_{s1}\,q_{s2}}{q_{s3}}}; \\ q_{sj} &= 1 - \sqrt{\frac{q_{s2}\,q_{s3}}{q_{s1}}}; \\ q_{sk} &= 1 - \sqrt{\frac{q_{s3}\,q_{s1}}{q_{s2}}}, \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

где

$$q_{s1} = 1 - (1 - q_{sz}\, q_{sy})(1 - q_{sx});$$

$$q_{s2} = 1 - (1 - q_{sx}\, q_{sz})(1 - q_{sy});$$

$$q_{s3} = 1 - (1 - q_{sx}\, q_{sy})(1 - q_{sz}).$$

При расчете некоторых сложных по структуре схем, элементы которых могут находиться в трех состояниях, необходимо знать точные формулы переходов от соединения элементов в виде «звезды» к эквивалентному по надежности соединению элементов вида «треугольник»; таких формул нет ни в одной из известных нам научных публикаций.

Сущность предлагаемого преобразования «звезда—треугольник» состоит в том, что соединение элементов в виде «звезды» (рис. 1,*а*) заменяется эквивалентным по надежности соединением в виде «треугольника» (рис. 1,*б*), т.е. задача сводится к определению эквивалентных вероятностей отказов элементов «треугольника»: $q_{ox}$, $q_{sx}$; $q_{oy}$, $q_{sy}$; $q_{oz}$, $q_{sz}$, через известные вероятности отказов элементов «звезды» $q_{oi}$, $q_{si}$; $q_{oj}$, $q_{sj}$; $q_{ok}$, $q_{sk}$.

Приведенные структуры (рис. 1,*а*, *б*) будут эквивалентны по надежности; если вероятность отказов (типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание») между узлами *А—С*, *А—В*, *С—В* «звезды» будет равна вероятности отказов между соответствующими узлами «треугольника». Между узлами *А* и *С* «звезды» существует один путь — через элементы *i* и *k*. Для узлов *А* и *С* «треугольника» существуют два пути — через элемент *x* и через элементы *y* и *z*, схема замещения для этого случая приведена на рис. 1,*в*. Аналогичным образом строятся и схемы замещения для путей *А—В* и *В—С* «звезды» и «треугольника» (рис. 1,*г*, *д*).

Используя полученные схемы замещения, формулы (2)—(6), получим две системы из трех нелинейных алгебраических уравнений. Ввиду того, что полученные две системы уравнений одинаковы по структуре, их можно представить в виде одной:

$$\left.\begin{aligned} a &= x(y+z-yz);\\ b &= y(x+z-xz);\\ c &= z(y+x-yx).\end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

Для случая, когда рассматриваются в элементах «звезды» и «треугольника» только отказы типа «обрыв цепи», коэффициенты *a*, *b* и *c* будут иметь вид:

$$a = q_{oi} + q_{ok} - q_{oi}q_{ok}; \quad b = q_{oi} + q_{oj} - q_{oi}q_{oj};$$

$$c = q_{oj} + q_{ok} - q_{oj}q_{ok}. \qquad (11)$$

Через *x*, *y*, *z* в системе уравнений (10) обозначаются вероятности отказов соответствующих элементов «треугольника»:

$$x = q_{ox}; \quad y = q_{oy}; \quad z = q_{oz}. \qquad (12)$$

В том случае, если в элементах «звезды» и «треугольника» рассматриваются только отказы типа «короткое замыкание», коэффициенты *a*, *b* и *c* в системе уравнений (10) будут определяться следующим образом:

$$a = p_{si} + p_{sk} - p_{si}p_{sk}; \quad b = p_{si} + p_{sj} - p_{si}p_{sj};$$

$$c = p_{sj} + p_{sk} - p_{sj}p_{sk}. \qquad (13)$$

При этом *x*, *y*, *z* будут означать вероятности безотказной работы соответствующих элементов:

$$\left.\begin{aligned} &x = p_{sx}; \quad y = p_{sy}; \quad z = p_{sz};\\ &q_{sx} = 1-p_{sx}; \quad q_{sy} = 1-p_{sy}; \quad q_{sz} = 1-p_{sz}.\end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Разделим правую и левую части уравнений (10) на произведение *xyz* и введем новые переменные *r*, *l*, *m*: $r=1/x$; $l=1/y$; $m=1/z$; $rlm=t$, тогда система уравнений (10) примет вид:

$$\left.\begin{aligned} at &= m+l-1;\\ bt &= m+r-1;\\ ct &= l+r-1;\\ rlm &= t.\end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

Сложив правые и левые части трех уравнений системы (15) и разделив обе части полученного уравнения на два, получим:

$$m + l + r - 1{,}5 = 0{,}5(a+b+c)t. \qquad (16)$$

Вычитая из уравнения (16) последовательно три первых уравнения системы (15), получаем:

$$\left.\begin{aligned} r - 0{,}5 &= 0{,}5(b+c-a)t;\\ l - 0{,}5 &= 0{,}5(a+c-b)t;\\ m - 0{,}5 &= 0{,}5(a+b-c)t;\\ rlm &= t.\end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Из системы уравнений (17) находим:

$$r = \frac{(b+c-a)t+1}{2}; \quad l = \frac{(a+c-b)t+1}{2}; \quad m = \frac{(a+b-c)t+1}{2}. \qquad (18)$$

Тогда

$$x = \frac{2}{(b+c-a)t+1}; \quad y = \frac{2}{(a+c-b)t+1}; \quad z = \frac{2}{(a+b-c)t+1}. \qquad (19)$$

Подставляя значения *r*, *l*, *m* из формулы (18) в четвертое уравнение системы (17) и производя соответствующие преобразования, получаем кубическое уравнение вида

$$t^3 + \alpha_1 t^2 + \alpha_2 t + \alpha_3 = 0, \qquad (20)$$

где

$$\left.\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{a+b+c}{(b+c-a)(a+b-c)(a+c-b)};\\ \alpha_2 &= \frac{a+b+c-8}{(b+c-a)(a+b-c)(a+c-b)};\\ \alpha_3 &= \frac{1}{(b+c-a)(a+b-c)(a+c-b)},\end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

Подстановка в уравнение (20) $t=y-\alpha_1/3$ приводит его к неполному виду [12]:

$$y^3+a_1y+c_1=0, \tag{22}$$

где

$$b_1=\frac{3\alpha_2-\alpha_1^2}{3};\; c_1=\frac{2\alpha_1^3}{27}-\frac{\alpha_1\alpha_2}{3}+\alpha_3;\; a_1=\left(\frac{b_1}{3}\right)^3+\left(\frac{c_1}{2}\right)^2.$$

Для нашего случая всегда $a_1<0$ и $b_1<0$, тогда $t_1$, $t_2$ и $t_3$ определяются следующим образом:

$$t_1=2\sqrt{\left(-\frac{b_1}{3}\right)}\cos\frac{\varphi}{3};\; t_{2,3}=2\sqrt{\left(-\frac{b_1}{3}\right)}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\pm\frac{2\pi}{3}\right),$$

где

$$\cos\varphi=-\frac{c_1}{2\sqrt{\left(-\frac{b_1}{3}\right)}}.$$

Определив $t_1$, $t_2$ и $t_3$ и подставив их значения в формулу (19), получим по три значения $x$, $y$ и $z$. Из каждой группы значений выбираем только те, которые удовлетворяют условиям $0<x_i<1$, $0<y_i<1$, $0<z_i<1$, $i=\overline{1,3}$.

Окончательно формулы переходов от «звезды» к эквивалентному по надежности «треугольнику» при учете отказов типа «обрыв цепи» получаются, если в формулу (19) подставить значения коэффициентов $a$, $b$, $c$, определяемых формулой (11), а вместо $x$, $y$ и $z$ подставить их значения из формулы (12):

$$\left.\begin{aligned} q_{ox}&=\frac{2}{[2q_{oj}+q_{oi}q_{ok}-q_{oj}(q_{oi}+q_{ok})]\,t+1};\\ q_{oy}&=\frac{2}{[2q_{ok}+q_{oi}q_{oj}-q_{ok}(q_{oi}+q_{oj})]\,t+1};\\ q_{oz}&=\frac{2}{[2q_{oi}+q_{oj}q_{ok}-q_{oi}(q_{ok}+q_{oj})]\,t+1}.\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

Подставим в формулы (21) значения $a$, $b$ и $c$, найденные с помощью выражений (11), после чего находим коэффициенты $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$ кубического уравнения (20), решая его, находим $t$. Подставляя полученное значение $t$ в формулы (23), находим эквивалентные вероятности отказов элементов «треугольника».

Формулы переходов от «звезды» к эквивалентному по надежности соединению в виде «треугольника» при учете только отказов элемента типа «короткое замыкание» получим, если в формулу (18) подставить значения коэффициентов $a$, $b$, $c$, найденные с помощью формулы (13), а вместо $x$, $y$, $z$ подставить их значения из (14):

$$\left.\begin{aligned} q_{sx}&=1-\frac{2}{[2p_{sj}+p_{si}p_{sk}-p_{sj}(p_{si}+p_{sk})]\,t+1};\\ q_{sy}&=1-\frac{2}{[2p_{sk}+p_{si}p_{sj}-p_{sk}(p_{si}+p_{sj})]\,t+1};\\ q_{sz}&=1-\frac{2}{[2p_{si}+p_{sj}p_{sk}-p_{si}(p_{sk}+p_{sj})]\,t+1}.\end{aligned}\right\} \tag{24}$$

Значения $t$ в формулах (24) находятся при решении кубического уравнения (20), коэффициенты $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$ находятся подстановкой в формулы (21) значений коэффициентов $a$, $b$, $c$, определяемых по формуле (13).

В тех случаях, если для элементов схемы заданы $\lambda_{oi}$ — интенсивности отказов типа «обрыв цепи» для $i$-го элемента и $\lambda_{si}$ — интенсивность отказов типа «короткое замыкание», то вероятность отказов $q_{oi}(T)$ (типа «обрыв цепи«) и $q_{si}(T)$ (типа «короткое замыкание») в течение времени $T$ определяется с помощью формул [11]:

$$\left.\begin{aligned} q_{oi}(T)&=\frac{\lambda_{oi}}{\lambda_{oi}+\lambda_{si}}\left[1-e^{-(\lambda_{oi}+\lambda_{si})T}\right];\\ q_{si}(T)&=\frac{\lambda_{si}}{\lambda_{si}+\lambda_{oi}}\left[1-e^{-(\lambda_{oi}+\lambda_{si})T}\right].\end{aligned}\right\} \tag{25}$$

Полученные в статье формулы (23) и (24) позволяют решать более сложные задачи определения надежности систем, которые нельзя решать с помощью только известных формул (1)—(9).

*Пример*. Для схемы, изображенной на рис. 2,*а*, требуется определить вероятность безопасной работы за время $T=2000$ ч. Каждый элемент, входящий в схему, может находиться в трех состояниях. Интенсивности отказов типа

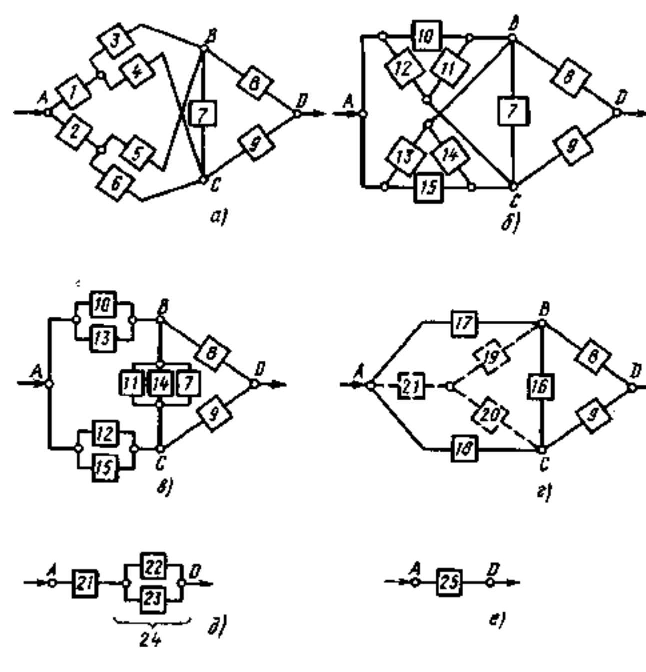

**Рис. 2.** Способ приведения сложной схемы к схеме, состоящей из одного эквивалентного элемента

«обрыв цепи» и «короткое замыкание» для каждого элемента схемы следующие:

$$\lambda_{o1} = 2{,}45\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s1} = 1{,}25\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o2} = 1{,}90\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s2} = 2{,}50\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o3} = 2{,}01\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s3} = 1{,}55\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o4} = 2{,}29\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s4} = 1{,}82\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o5} = 2{,}50\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s5} = 1{,}29\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o6} = 2{,}32\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s6} = 1{,}95\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o7} = 2{,}00\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s7} = 2{,}55\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o8} = 2{,}00\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s8} = 1{,}60\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};$$

$$\lambda_{o9} = 1{,}50\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1};\ \lambda_{s9} = 2{,}30\cdot 10^{-4}\ \text{ч}^{-1}.$$

Используя формулы (25) для $T=2000$ ч, находим:

$$q_{o1} = 0{,}34624;\quad q_{s1} = 0{,}17665;$$

$$q_{o2} = 0{,}25271;\quad q_{s2} = 0{,}33251;$$

$$q_{o3} = 0{,}28758;\quad q_{s3} = 0{,}22176;$$

$$q_{o4} = 0{,}31227;\quad q_{s4} = 0{,}24818;$$

$$q_{o5} = 0{,}35053;\quad q_{s5} = 0{,}18087;$$

$$q_{o6} = 0{,}31203;\quad q_{s6} = 0{,}26226;$$

$$q_{o7} = 0{,}26263;\quad q_{s7} = 0{,}33485;$$

$$q_{o8} = 0{,}28514;\quad q_{s8} = 0{,}22811;$$

$$q_{o9} = 0{,}21013;\quad q_{s9} = 0{,}32220.$$

К «звездам» схемы (рис. 2,*а*), состоящим из элементов *1, 3, 4* и *2, 5, 6*, применим преобразование «звезда—треугольник», используя формулы (23) и (24), и определим вероятность отказов эквивалентных элементов *10, 11, 12* и *13, 14, 15* (рис. 2,*б*):

$$q_{o10} = 0{,}62406;\quad q_{s10} = 0{,}03701;$$

$$q_{o11} = 0{,}58692;\quad q_{s11} = 0{,}05357;$$

$$q_{o12} = 0{,}65157;\quad q_{s12} = 0{,}04194;$$

$$q_{o13} = 0{,}60200;\quad q_{s13} = 0{,}05671;$$

$$q_{o14} = 0{,}67090;\quad q_{s14} = 0{,}04282;$$

$$q_{o15} = 0{,}55912;\quad q_{s15} = 0{,}08498.$$

Все параллельно соединенные элементы *10, 13*; *12, 15*; *11, 14, 7* (рис. 2,*в*) заменим эквивалентными *16, 17, 18*, которые определим с помощью формул (6) и (7):

$$q_{o16} = 0{,}10341;\quad q_{s16} = 0{,}39744;$$

$$q_{o17} = 0{,}37568;\quad q_{s17} = 0{,}09162;$$

$$q_{o18} = 0{,}36430;\quad q_{s18} = 0{,}59536.$$

Применив к соединению элементов в виде треугольника *ABC* (рис. 2,*г*) преобразование «треугольник—звезда» [формулы (8), (9)], находим параметры эквивалентных элементов:

$$q_{o19} = 0{,}03237;\quad q_{s19} = 0{,}67899;$$

$$q_{o20} = 0{,}03101;\quad q_{s20} = 0{,}22869;$$

$$q_{o21} = 0{,}13352;\quad q_{s21} = 0{,}13581.$$

Используя формулы (4)—(7) (рис. 2,*д*), находим:

$$q_{o22} = 0{,}30828;\quad q_{s22} = 0{,}21877;$$

$$q_{o23} = 0{,}23462;\quad q_{s23} = 0{,}32467;$$

$$q_{o24} = 0{,}07233;\quad q_{s24} = 0{,}07430;$$

$$q_{o25} = 0{,}19619;\quad q_{s25} = 0{,}07430.$$

Используя соотношение (1), находим вероятность безотказной работы схемы в течение $T=2000$ ч:

$$R = 1 - q_{o25} - q_{s25} = 0{,}72951.$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козлов Б.А., Ушаков И.С.** Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. — М.: Сов. радио, 1975.

2. **Рябинин И.А.** Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. — Л.: Судостроение, 1971.

3. **Надежность и эффективность в технике:** Справочник. Т. 5.: Проектный анализ надежности / Под ред. В.И. Потушева и Л.И. Рембезы. — М.: Машиностроение, 1988.

4. **Рябинин И.А., Смирнов А.С.** Схемно-логический метод исследования структурной надежности невосстанавливаемых систем. — Электричество, 1971, № 5.

5. **Рябинин И.А., Парфенов Ю.М., Цыпин О.Д.** Логико-вероятностная теория безопасности технических систем. — Электричество, 1994, № 7.

6. **Зорин В.В.** и др. Надежность систем электроснабжения. — Киев: Высшая школа, 1984. — 191 с.

7. **Разгильдеев Г.И., Ковалев А.П., Сердюк Л.И.** О надежности систем электроснабжения угольных шахт. — Уголь Украины, 1982, № 1.

8. **Дружинин Г.В.** Надежность автоматизированных производственных систем. — 4-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

9. **Барлоу Р., Прошан Ф.** Математическая теория надежности / Пер. с англ., под ред. Б.В. Гнеденко. — М.: Советское радио, 1969.

10. **Ковалев А.П., Сердюк Л.И.** Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов. — Электричество, 1985, № 10.

11. **Диллон Б., Сингх Ч.** Инженерные методы обеспечения надежности систем / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984.

12. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. — М.: Наука, 1981.

*[12.05.97]*

*Авторы:* ***Ковалев Александр Петрович*** *окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института (ДПИ) в 1971 г. и математический факультет Донецкого государственного университета в 1977 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Основы теории и методы оценки безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах» в ДПИ. Профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» Донецкого государственного технического университета (ДГТУ), Украина.*

***Спиваковский Алексей Валерьевич*** *окончил энергетический факультет ДГТУ. Аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ДГТУ, Украина.*