

## Методика поиска многоконтурной защитной структуры на транспортной сети телекоммуникационной системы

### Search technique of multiple protective structures on the traffic network of telecommunication system

#### Жигadlo / Zhigadlo V.

Валентин Эдуардович  
(Zhigadlo@loniis.ru)

доктор технических наук, доцент.  
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение  
центрального научно-исследовательского института  
связи» (ЛО ЦНИИС), директор.  
г. Санкт-Петербург

#### Зюзин / Zyuzin A.

Александр Николаевич  
(alexz01@bk.ru)

кандидат технических наук.  
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи  
имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»  
МО РФ, преподаватель.  
г. Санкт-Петербург

#### Лыжинкин / Lyzhinkin K.

Константин Владимирович  
(lkv@loniis.ru)

ЛО ЦНИИС,  
заместитель директора.  
г. Санкт-Петербург

#### Ясинский / Jasinski S.

Сергей Александрович  
(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.  
ЛО ЦНИИС,  
научный консультант.  
г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** адаптивные фильтры – adaptive filters; доплеровская фаза – doppler phase; коэффициенты корреляции – correlation coefficients; обработка сигналов – signal processing; пассивные помехи – clutters; точность оценивания – estimation accuracy; функция правдоподобия – plausibility function.

Рассматривается методика поиска многоконтурных защитных структур для транспортной сети телекоммуникационной системы, которая позволяет найти потоковую структуру системы резервирования и рассчитать резервные пропускные способности ребер сети.

The analysis of adaptive quasioptimal system 'the rejection filter-the multi-channel filter' is carried out in article. Connection between suppression of clutters in system and errors of adaptation of weight adaptive ratio of rejection and multi-channel filters to unknown parameters of clutters is established. The received ratios allow selection the training sample volume depending on the given value of adaptation losses, spectral and correlative properties of a clutter and structure of processing system.

В настоящее время во всем мире создаются телекоммуникационные системы (ТКС) на самых современных сетевых и информационных технологиях, позволяющих предоставлять пользователям самые разнообразные услуги, начиная от цифровой телефонии и заканчивая услугами мультимедиа. Соответственно, транспортные сети (ТС), обеспечивающие работу телекоммуникационных систем, усложняются, становятся все более

производительными и неоднородными. При этом любые повреждения ТС ТКС приводят к потерям передаваемой информации в ТКС. Таким образом, задача совершенствования систем резервирования ТС ТКС приобретает особую важность и актуальность.

В настоящее время активно используются варианты резервирования линейного тракта (секций мультиплексирования) или соединения (тракта высокого или низкого порядка, оптических каналов, виртуальных соединений при пакетной передаче), которые реализуются методами 1+1, 1:N или резервированием методом самовосстанавливающихся колец. Кроме того, для резервирования высокосвязных топологических структур исследуются механизмы резервирования на основе р-циклов (*p-cycle*, *preconfigured protection cycle*), для резервирования ТС ТКС с неоднородной потоковой структурой рассматривают многоконтурные защитные структуры (МЗС) [1–5].

Под МЗС понимаем замкнутый контур с резервной пропускной способностью на ТС ТКС, который декомпозируется на линиях передачи с избыточной пропускной способностью на несколько замкнутых контуров с меньшей пропускной способностью. Целевая функция, учитывающая требование по снижению избыточности пропускной способности сетевого резерва МЗС, выглядит следующим образом [5]:

$$U_{\text{рез.}}^{\text{МЗС}} = \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N c_{ij}^k \times u_{ij}^k \rightarrow \min, \quad (1)$$

где:  $K$  – количество защитных контуров в МЗС,  $u^k_{ij}$  – резервная пропускная способность  $k$ -го защитного контура ( $k$  – индекс (порядковый номер) защитного контура), а

$$c^k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й защитный контур} \\ & \text{проходит через ребро } b_{ij} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Задача поиска МЗС как подсистемы ТС ТКС заключается в определении ее потоковой структуры. Потоковая структура МЗС, в свою очередь, будет представлять собой взаимосвязанную конструкцию структур всех защитных контуров входящих в состав МЗС. Для формализации этой задачи удобно использовать известные элементы теории графов, где многосвязная потоковая структура ТС ТКС, изображенная в качестве примера на рис. 1, моделируется ненаправленным графом  $G = \{A, B, U, L\}$ . В этом графе множество вершин  $A = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$  соответствует множеству узлов ТС с общим числом  $N$ , а множество ребер  $B = \{b_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  описывает линии передачи между этими узлами, на котором определены: матрица пропускных способностей  $U = \{u_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  и значения длин линий передачи  $L = \{l_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ . При этом требуется найти некоторое множество защитных контуров  $C = \{C^k; k = \overline{1, K}\}$ , где  $K$  – количество контуров, в котором каждый защитный контур определяется множеством образующих его ребер  $C^k = \{c^k_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  и множеством пропускных способностей этих ребер  $U^k = \{u^k_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ .

Таким образом, задачу поиска МЗС для ТС ТКС целесообразно декомпозировать на две подзадачи:

– подзадача определения резервных пропускных способностей МЗС для линий передачи  $U_{рез} = \{u^{рез}_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ , которые являются подмножеством множества пропускных способностей графа  $G = \{A, B, U, L\}$ ,  $U_{рез}(B) \in U(B)$ ;

– подзадача определения взаимоувязанных конструкций потоковых структур защитных контуров  $C^k = \{c^k_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  с расчетом пропускных способностей каждого контура  $U^k = \{u^k_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ .

Решение первой подзадачи будет состоять в определении резервных пропускных способностей МЗС для линий передачи  $U_{рез} = \{u^{рез}_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ , которые нужно учитывать при синтезе потоковой структуры ТС ТКС  $G = \{A, B, U, L\}$ .

Решением второй подзадачи будет определение топологических  $C^k = \{c^k_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  и потоковых структур  $U^k = \{u^k_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  защитных контуров, которые будут использоваться при технической реализации и выстраивании логики работы МЗС на реальном участке сети ТС ТКС.

Для решения первой подзадачи – определения резервных пропускных способностей линий передачи ТС ТКС, предлагается использовать следующий алгоритм (рис. 2) [6]:

1. В матрице пропускных способностей  $U = \|u_{ij}\|$  находится элемент с максимальным значением пропускной способности –  $U_{max} = \max \|u_{ij}\|$ .

2. Между узлами, инцидентными ребру, найденному в предыдущем пункте, производится поиск кратчайшего

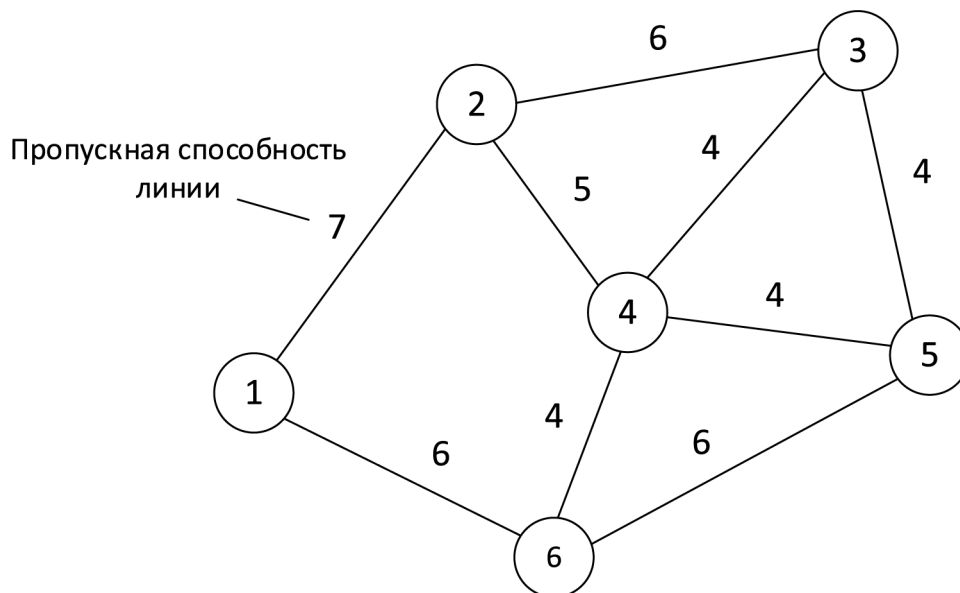


Рис. 1. Пример многосвязной потоковой структуры ТС ТКС с различными значениями пропускных способностей линий передачи

пути на полной матрице  $L = \|l_{ij}\|$ , например при помощи алгоритма Дейкстры [7]. Ребра, вошедшие в кратчайший путь и ребро с максимальным значением пропускной способности, формируют первичный защитный контур. При этом защитный контур соответствует ориентированному по часовой стрелке подграфу  $G^1 \{A^1, B^1, U^1\}$ .

3. Из матрицы пропускных способностей  $U = \|u_{ij}\|$  вычеркиваются элементы, вошедшие в подграф  $G^1 \{A^1, B^1, U^1\}$  (соответствующим значениям присваивается ноль), а процедура поиска первичного защитного контура повторяется (шаги 2–5). Если в результате работы шага 5 матрица пропускных способностей обнулена (все значения равны нулю), то выполняется шаг 7.

4. Производится процедура объединения полученного в шаге 5 множества ориентированных графов  $G^k \{A^k, B^k, U^k\}$ . В результате формируется матрица резервных пропускных способностей  $G^k \{A^k, B^k, U^k\}$ .

Для решения второй подзадачи предлагается на существующем графе  $G = \{A, B, U, L\}$  с найденными в ходе решения первой подзадачи значениями резервных пропускных способностей  $U_{рез} = \{u_{рез, ij}^{рез}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  выполнить его декомпозицию на неориентированные циклы с учетом минимальных значений резервных пропускных способностей [8].

Для рассмотрения порядка решения второй подзадачи предлагается использовать алгоритм определения структуры защитных контуров МЗС с расчетом их пропускных способностей (рис. 3), который состоит в следующем:

1. В матрице резервных пропускных способностей  $U_{рез} = \|u_{рез, ij}^{рез}\|$  находится элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности, то есть  $U_{рез, min}^{рез} = \min \|u_{рез, ij}^{рез}\|$  и  $U_{рез, max}^{рез} = \max \|u_{рез, ij}^{рез}\|$ .

2. Между инцидентными узлами ребру  $U_{рез, min}^{рез} = \min \|u_{рез, ij}^{рез}\|$ , найденному в предыдущем пункте, производится поиск кратчайшего пути на полной матрице  $L = \|l_{ij}\|$ . Для этого возможно использовать алгоритм Дейкстры, но с таким учетом, чтобы найденный путь включал ребро  $U_{рез, max}^{рез} = \max \|u_{рез, ij}^{рез}\|$ . Ребра, вошедшие в кратчайший путь, и ребра с максимальным и минимальным значением резервной пропускной способности формируют защитный контур  $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  с последующим определением его пропускных способностей  $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ , которые будут соответствовать  $U_{рез, min}^{рез} = \min \|u_{рез, ij}^{рез}\|$  для каждого ребра защитного контура.

3. Из матрицы резервных пропускных способностей  $U_{рез} = \|u_{рез, ij}^{рез}\|$  вычитаются значения пропускных способностей найденного контура  $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ . В случае достижения нулевого значения элемента матрицы  $U_{рез} = \|u_{рез, ij}^{рез}\|$  соответствующее ребро в шаге 2 не рассматривается. Процедура поиска защитных контуров (шаг 2–5) повторяется до полного обнуления матрицы резервных пропускных способностей  $U_{рез} = \|u_{рез, ij}^{рез}\|$ .

Результатом работы алгоритма является определенное множество защитных контуров  $C = \{C^k; k = \overline{1, K}\}$ ,

где каждый защитный контур определен множеством ребер его образующих  $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  и пропускными способностями ребер  $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ , входящих в каждый контур.

Для оценки адекватности предложенной методики рассмотрим пример поиска МЗС для ТС ТКС. На первом этапе определим резервные пропускные способности линий передачи. Пример решения этой подзадачи методики рассмотрим на высокосвязной потоковой структуре ТС ТКС, представленной на рис. 1, которая характеризуется матрицей пропускных способностей (выражение 2) и матрицей расстояний (выражение 3):

$$U = \begin{vmatrix} - & 7 & 0 & 0 & 0 & 6 \\ 7 & - & 6 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & - & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & - & 6 \\ 6 & 0 & 0 & 4 & 6 & - \end{vmatrix}; \quad (2)$$

$$L = \begin{vmatrix} - & 35 & 0 & 0 & 0 & 35 \\ 35 & - & 40 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & - & 40 & 30 & 0 \\ 0 & 25 & 40 & - & 30 & 25 \\ 0 & 0 & 30 & 30 & - & 45 \\ 35 & 0 & 0 & 25 & 45 & - \end{vmatrix}. \quad (3)$$

В соответствии с предложенной методикой воспользуемся алгоритмом поиска резервных пропускных способностей  $-U_{рез} = \{u_{рез, ij}^{рез}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ . Для этого:

1. Найдем ребро 1–2 с максимальным значением пропускной способности:  $U_{max} = \max \|7_{12}\|$ .
2. Найдем кратчайший путь от вершины 2 к вершине 1 без учета ребра 1–2 и получим ориентированный по часовой стрелке цикл №1 (рис. 4).

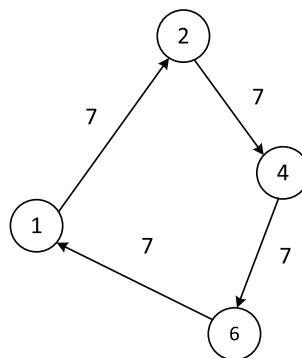


Рис. 4. Ориентированный цикл №1 для примера расчета

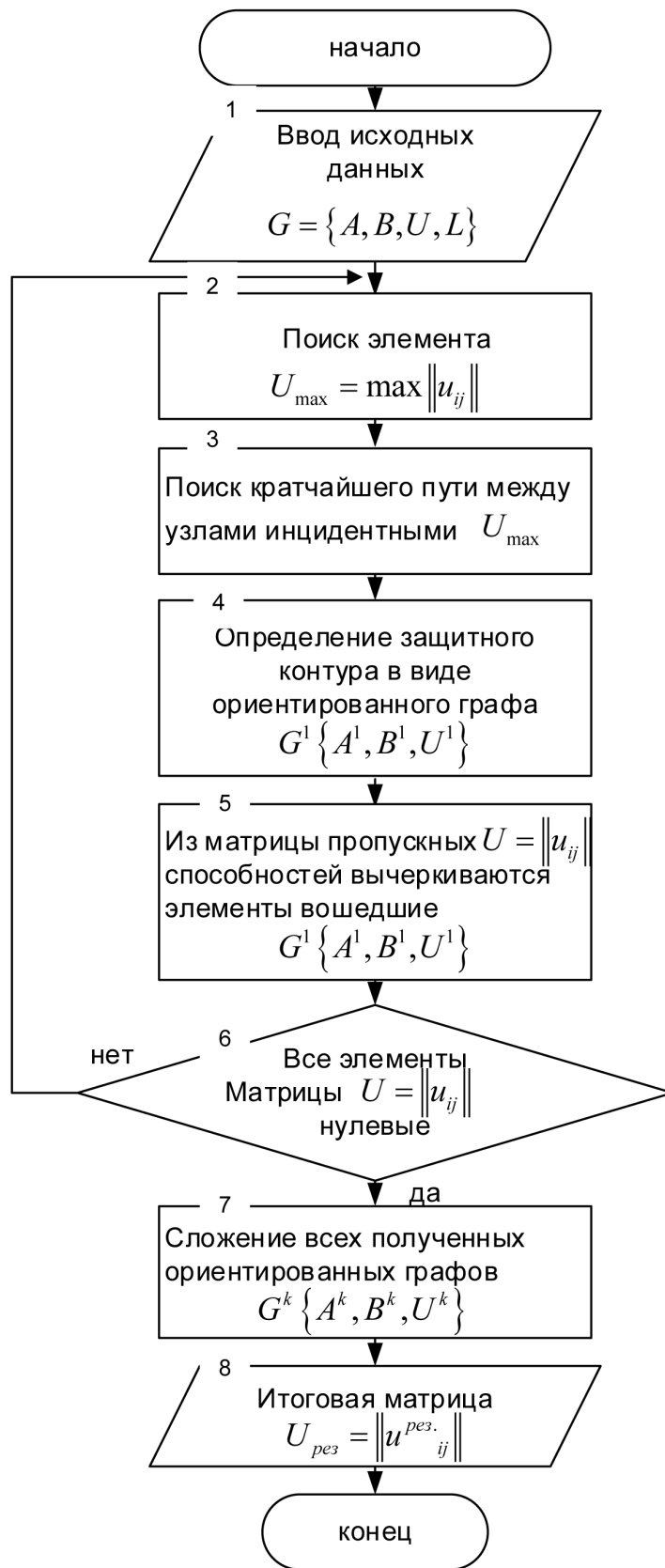


Рис. 2. Алгоритм поиска резервных пропускных способностей

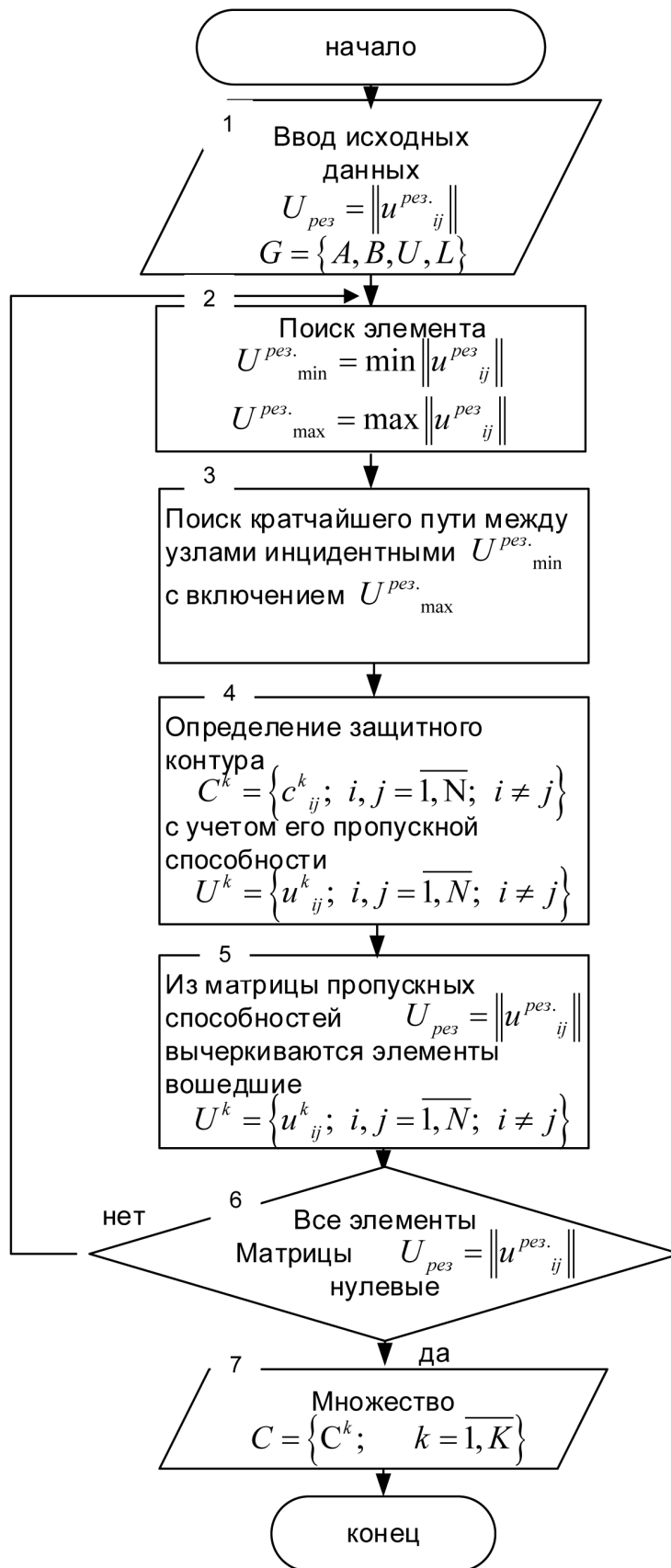


Рис. 3. Алгоритм определения структуры защитных контуров МЗС с расчетом их пропускных способностей

3. Матрица пропускных способностей, полученная после удаления ребер, которые вошли в ориентированный цикл №1, имеет следующий вид:

$$U' = \begin{pmatrix} - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & - & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & - & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & - \end{pmatrix}.$$

4. Найдем ребро с максимальным значением пропускной способности для матрицы (выражение 4) – это ребро 2–3 с пропускной способностью 6:  $U_{\max} = \max \|6_{23}\|$ .

5. Найдем кратчайший путь от вершины 3 к вершине 2 без учета ребра 2–3 и получим ориентированный по часовой стрелке цикл №2 (рис. 5).

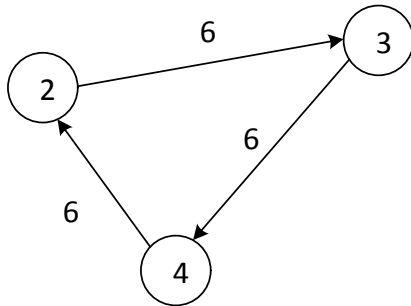


Рис. 5. Ориентированный цикл №2 для примера расчета

6. Матрица пропускных способностей, полученная после удаления ребер, которые вошли в ориентированный цикл №2, имеет следующий вид:

$$U'' = \begin{pmatrix} - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & - & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & - \end{pmatrix}.$$

(5)

7. Найдем ребро с максимальным значением пропускной способности для матрицы (выражение 5) – это ребро 5–6 с пропускной способностью 6:  $U_{\max} = \max \|6_{56}\|$ .

8. Найдем кратчайший путь от вершины 5 к вершине 6, без учета ребра 5–6, и получим ориентированный по часовой стрелке цикл №3 (рис. 6).

9. Матрица пропускных способностей, полученная после удаления ребер, которые вошли в ориентированный цикл №3, имеет следующий вид:

$$U''' = \begin{pmatrix} - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & - \end{pmatrix}.$$

(6)

10. Найдем ребро с максимальным значением пропускной способности для матрицы (выражение 6) – это ребро 3–5 с пропускной способностью 4:  $U_{\max} = \max \|4_{35}\|$ .

11. Найдем кратчайший путь от вершины 3 к вершине 5, без учета ребра 3–5 и получим ориентированный по часовой стрелке цикл №4 (рис. 7).

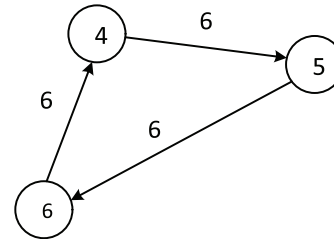


Рис. 6. Ориентированный цикл №4 для примера расчета

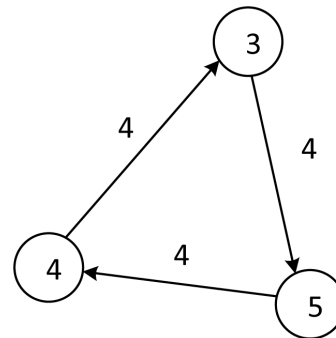


Рис. 7. Ориентированный цикл №3 для примера расчета

12. Матрица пропускных способностей, которая получилась после удаления ребер вошедших в ориентированный цикл №4 (нулевая). После объединения ориентированных циклов №1, №2, №3 и №4 получится структура ТС, представленная на рис. 8.

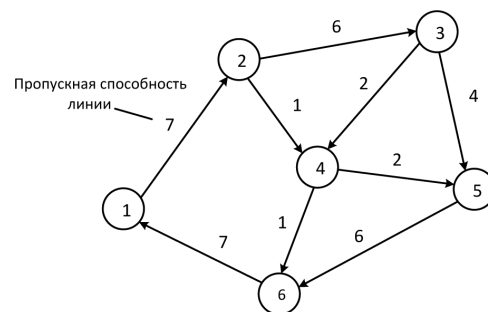


Рис. 8. Структура ТС, полученная в результате объединения ориентированных циклов №1, №2, №3 и №4

Суммарная резервная пропускная способность для этой структуры составит 36 условных единиц пропускной способности, а матрица резервных пропускных способностей будет иметь следующий вид:

$$U_{рез.} = \begin{pmatrix} - & 7 & 0 & 0 & 0 & 7 \\ 7 & - & 6 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & - & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 4 & 2 & - & 6 \\ 7 & 0 & 0 & 1 & 6 & - \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Результатом решения подзадачи определения резервных пропускных способностей линий передачи ТС ТКС являются полученные значения резервных пропускных способностей линий передачи, то есть  $U_{рез.} = \{u_{рез. ij}; i, j = 1, N; i \neq j\}$ .

Далее в соответствии с предлагаемой методикой приступим к решению второй подзадачи определения структуры защитных контуров МЗС с расчетом их пропускных способностей (рис.3):

1. В матрице резервных пропускных способностей (7) находим элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности:  $U_{рез. min} = \min \|1_{рез. 24}\|$  и  $U_{рез. max} = \max \|7_{рез. 12}\|$ .

2. Найдим кратчайший путь от вершины 2 к вершине 4 без учета ребра 2-4, но с учетом ребра 1-2. В результате получили защитный контур №1 для примера расчета (рис. 9) с пропускной способностью 1.

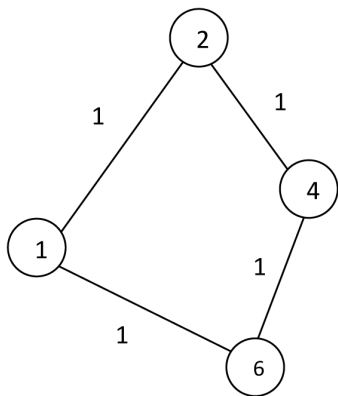


Рис. 9. Защитный контур №1 для примера расчета

3. Из матрицы резервных пропускных способностей (7) вычитаем значения пропускных способностей защитного контура №1, в результате чего полученная матрица будет иметь следующий вид:

$$U'_{рез.} = \begin{pmatrix} - & 6 & 0 & 0 & 0 & 6 \\ 6 & - & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & - & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 2 & - & 6 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 6 & - \end{pmatrix}.$$

4. В матрице (8) находим элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности, то есть  $U_{рез. min} = \min \|2_{рез. 34}\|$  и  $U_{рез. max} = \max \|6_{рез. 12}\|$ .

5. Найдим кратчайший путь от вершины 3 к вершине 4 без учета ребра 3-4, но с учетом ребра 1-2, в результате чего получим защитный контур №2 для примера расчета (рис. 10) с пропускной способностью 2.

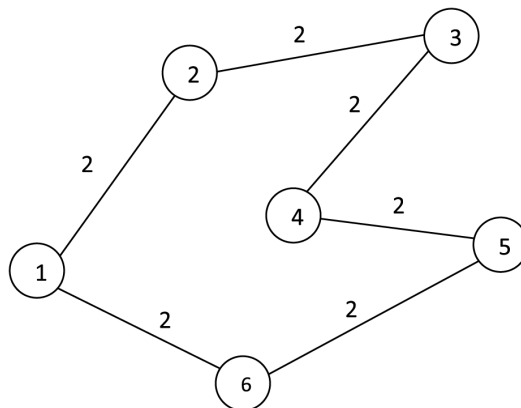


Рис. 10. Защитный контур №2 для примера расчета

6. Из матрицы резервных пропускных способностей (8) вычитаем значения пропускных способностей защитного контура №2. Полученная матрица будет иметь следующий вид:

$$U''_{рез.} = \begin{pmatrix} - & 4 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 4 & - & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & - & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & - & 4 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 4 & - \end{pmatrix}. \quad (9)$$

7. В матрице (9) находим элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности, то есть  $U_{рез. min} = \min \|4_{рез. 12}\|$  и  $U_{рез. max} = \max \|4_{рез. 12}\|$ .

8. Найдим кратчайший путь от вершины 1 к вершине 2 без учета ребра 1-2, в результате чего получим защитный контур №3 для примера расчета (рис. 11) с пропускной способностью 4.

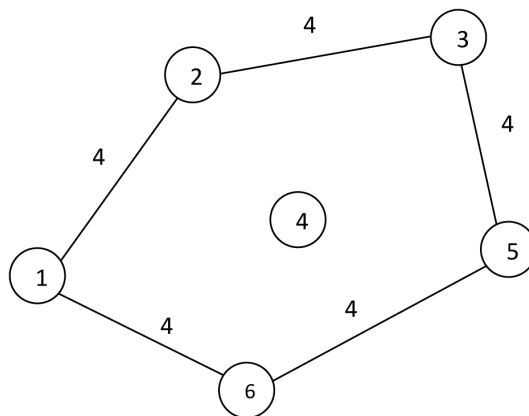


Рис. 11. Защитный контур №3 для примера расчета

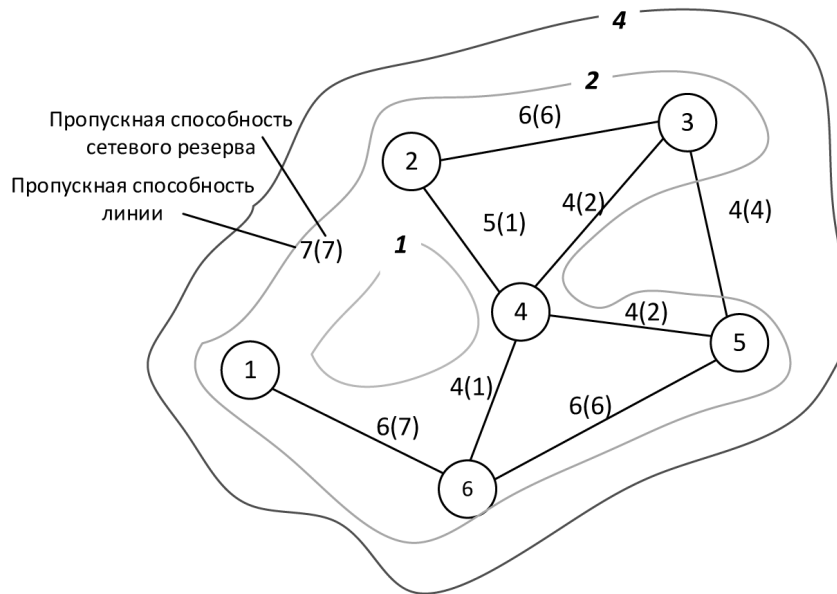


Рис. 12. Структура ТС при резервировании многоконтурной защитной структурой

9. Из матрицы резервных пропускных способностей (9) вычитаются значения пропускных способностей защитного контура №3, а полученная матрица будет нулевой. Таким образом, найдены три защитные структуры контуров №1, №2 и №3 и определены их пропускные способности – 1, 2 и 4, соответственно (рис. 12).

Таким образом, найдена потоковая структура МЗС, которая представляет собой в качестве примера взаимосвязанные структуры защитных контуров с рассчитанными пропускными способностями для каждого защитного контура МЗС (рис. 12). Полученный результат исследования подтверждает работоспособность предложенной методики. Следовательно, рассмотренная методика поиска МЗС на ТС ТКС может использоваться при решении задач планирования и развития современных ТС ТКС с учетом сетевого резервирования для ТС.

Дальнейшие направления исследований по оптимальному поиску МЗС для ТС ТКС будут направлены на моделирование работы МЗС при различных моделях воздействия злоумышленников и на формулирование предложений по технической реализации МЗС для ТС ТКС. Внедрение рассмотренного механизма организации резервирования позволит существенно снизить затраты на организацию резерва и значительно повысить эффективность затрат на построение и эксплуатацию ТС ТКС [5].

### Литература

1. Зюзин, А. Н. Совершенствование систем сетевого резервирования транспортной сети магистрального оператора

связи / А.Н. Зюзин, И.С. Каминецкий // Электросвязь. – 2005. – № 11. – С. 18.

2. New option and insights for survivable transport networks / W.D. Grover [et al.] // IEEE Communications Magazine, January 2002. – P. 34–41.

3. Grover, W. D. The Forcer Concept and Express Route Planning in Meshsurvivable Networks / W. D. Grover, D. Y. Li // Journal of Network and Systems Management. – 1999. – Vol. 7, No. 2. – P. 199–223.

4. Подход к поиску отказоустойчивой структуры транспортной сети телекоммуникационной системы на основе р-циклов / В.В. Ефимов [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 36–39.

5. Ефимов, В. В. Модификация кольцевых механизмов резервирования для неравномерных потоковых структур транспортных сетей связи / В.В. Ефимов, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Электросвязь. – 2016. – № 12. – С. 68–70.

6. Алгоритм определения резервной пропускной способности линий передачи транспортной сети телекоммуникационной системы для многоконтурных защитных структур / В.В. Ефимов [и др.] // Информация и Космос. – 2017. – № 1. – С. 29–33.

7. Майника, Э. Алгоритмы оптимизации на сетях графах / Э. Майника ; Пер. с англ. М.Б. Кацнельсона, М.И. Рубинштейна; под редакцией Е.К. Масловского. – М.: Мир, 1981. – 323 с.

8. Алгоритм определения защитных контуров для многоконтурных защитных структур на транспортной сети телекоммуникационной системы / В.В. Ефимов [и др.] // Информация и Космос. – 2017. – № 2. – С. 42–47.