

# Алгоритм определения резервной пропускной способности линий передачи транспортной сети телекоммуникационной системы для многоконтурных защитных структур

## Determination algorithm for reserve capacity of transmission lines of the transport network of telecommunication system for multicircuit protective structures

**Ефимов / Efimov V.**

Вячеслав Викторович

(vve@loniis.ru)

кандидат технических наук, доцент.

Филиал ФГУП «Ленинградское

отделение центрального научно-исследовательского института связи» (ЛО ЦНИИС),

и. о. директора.

г. Санкт-Петербург

**Ясинский / Yasinsky S.**

Сергей Александрович

(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.

Филиал ФГУП ЛО ЦНИИС,

научный консультант.

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

**Ключевые слова:** телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть – transport network; отказоустойчивая структура – fault-free structure; многоконтурная защитная структура – multicircuit protective structure; резервная пропускная способность – reserve capacity.

Рассматривается алгоритм определения резервной пропускной способности линий передачи транспортной сети телекоммуникационной системы для многоконтурных защитных структур, который позволяет рассчитать необходимую резервную пропускную способность линий передачи для работы механизма резервирования.

The article describes the algorithm of determination of reserve capacity of transmission lines of the transport network of telecommunication system for multicircuit protective structures, which allows to calculate the required reserve capacity of transmission lines for operation of a protection mechanism.

С каждым годом объемы передаваемого трафика в транспортных сетях (ТС) телекоммуникационных систем (ТКС) существенно увеличиваются. Повреждения ТС ТКС приводят к огромным потерям информации. Поэтому с увеличением трафика на ТС ТКС создание и совершенствование ее системы резервирования приобретает особую актуальность.

К настоящему моменту известны варианты резервирования линейного тракта (секций мультиплексирования) или соединения (тракта высокого или низкого порядка, оптических каналов, виртуальных соединений при пакетной передаче), которые реализуются методами  $1+1$ ,  $1:N$  и методом самовосстанавливающихся колец. Кроме того, для резервирования топологических структур с высокой связностью рассматриваются механизмы резервирования на основе  $p$ -циклов (*p-cycle*, *preconfigured protection cycle*) [1–4].

Исходя из логики работы механизмов резервирования для высокосвязных топологий ТС ТКС, потоковая структура сети должна быть квазиоднородной, в которой пропускные способности резервируемых линий сети должны быть примерно одинаковыми. В этом случае использование большинства схем резервирования является более эффективным и целесообразным. Однако привести потоковую структуру к квазиоднородной структуре не всегда возможно, поэтому резерв пропускной способности будет обладать избыточностью, которая в свою очередь будет зависеть от степени неоднородности потоковой структуры [4, 5, 6].

Для снижения избыточности резервной пропускной способности линий передачи ТС возможно модифицировать известный подход к организации системы резервирования на основе  $p$ -циклов. При этом замкнутый контур с резервной пропускной способностью предлагается декомпозировать на линиях передачи ТС ТКС, где имеется избыточная резервная пропускная способ-

ность, на несколько замкнутых контуров с меньшей пропускной способностью, которые будут проходить через различные узлы. Этот способ получил название – резервирование с использованием многоконтурных защитных структур (МЗС) [5].

Многоконтурная защитная структура – это система взаимосвязанных защитных контуров (замкнутых циклов) с предварительно рассчитанной пропускной способностью, которая определена на структуре ТС ТКС для снижения избыточности пропускной способности сетевого резерва, выражаемая в формализованном виде, как:

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

где:  $K$  – количество защитных контуров в МЗС,  $u_{ij}^k$  – резервная пропускная способность  $k$ -ого защитного контура, а

$$c_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-ый защитный контур} \\ & \text{проходит через ребро } b_{ij}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Важным этапом реализации МЗС является расчет резервных пропускных способностей линий передачи ТС ТКС и поиск топологии МЗС с расчетом пропускных способностей защитных контуров. Задачу поиска МЗС предлагается сформулировать с использованием элементов теории графов. Например, много-связная потоковая структура, изображенная на рис. 1, будет характеризоваться простым ненаправленным графом  $G = \{A, B, U, L\}$ . В этом графе множество вершин графа  $A = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$  соответствует множеству узлов сети с общим числом  $N$ , а множество ребер графа  $B = \{b_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  описывает линии передачи между этими узлами, на котором определена матрица

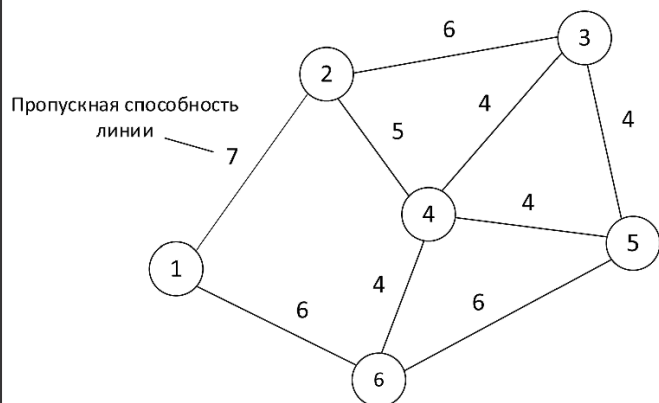


Рис. 1. Пример высокосвязной потоковой структуры сети связи с различными значениями пропускных способностей линий связи

пропускных способностей  $U = \{u_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  и значения длин линий передачи  $L = \{l_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ . Требуется найти некоторое множество защитных контуров  $C = \{C^k; k = \overline{1, K}\}$ , где  $K$  – количество контуров, в котором каждый защитный контур определяется множеством ребер его образующих  $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  и множеством их пропускных способностей  $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ .

Задачу поиска МЗС для ТС ТКС целесообразно разделить на две подзадачи: подзадачу определения резервных пропускных способностей для линий передачи  $U_{рез.} = \{u_{рез.}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  и подзадачу выделения защитных контуров  $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$  с определением пропускных способностей каждого контура  $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ .

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

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 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  $U_{рез.} = \|u_{рез.}\|$ .

Для оценки адекватности предложенного алгоритма рассмотрим пример определения резервных пропускных способностей линий передачи ТС ТКС для МЗС. Этот пример работы алгоритма рассмотрим на высокосвязной потоковой структуре ТС ТКС, представленной на рис. 1, которая характеризуется матрицей пропускных способностей (выражение 2) и матрицей расстояний (выражение 3).

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



Рис. 2. Алгоритм поиска резервных пропускных способностей

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

В соответствии с предложенным алгоритмом необходимо найти значения резервных пропускных способностей  $U_{рез.} = \{u_{рез.ij}; i, j = \overline{1..N}; i \neq j\}$ . Для этого:

1. Найдем ребро с максимальным значением пропускной способности – это ребро 1–2 с пропускной способностью 7:  $U_{max} = \max \|7_{12}\|$ .

2. Найдем кратчайший путь от вершины 2 к вершине 1 без учета ребра 1–2 и получим ориентированный по часовой стрелке цикл №1 (рис. 3).

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

$$U' = \begin{vmatrix} - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & - & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & - & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & - \end{vmatrix} \quad (4)$$

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. 4).

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

$$U'' = \begin{vmatrix} - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & - & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & - \end{vmatrix} \quad (6)$$

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. 5).

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

$$U''' = \begin{vmatrix} - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & - \end{vmatrix} \quad (7)$$

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 5 к вершине 3 без учета ребра 3–5 и получим ориентированный по часовой стрелке цикл № 4 (рис. 6).

12. Матрица пропускных способностей, которая получится после удаления ребер вошедших ориентированный цикл № 4 (нулевая). После объединения ориентированных циклов № 1, № 2, № 3 и № 4 получится структура, представленная на рис. 7.

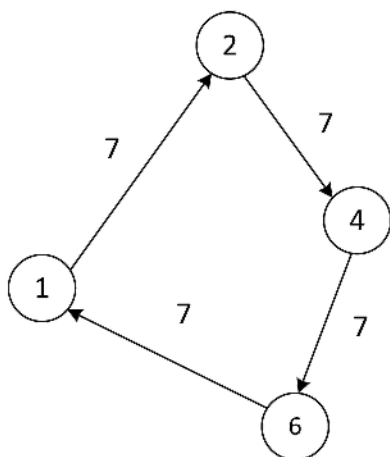


Рис. 3. Ориентированный цикл № 1 для примера расчета

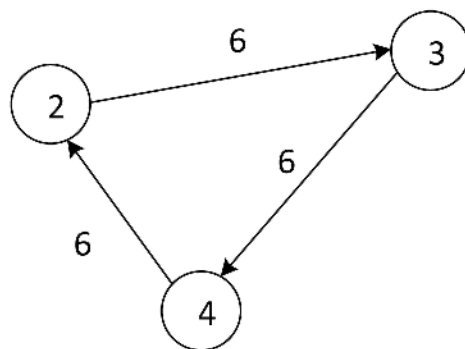


Рис. 4. Ориентированный цикл № 2 для примера расчета

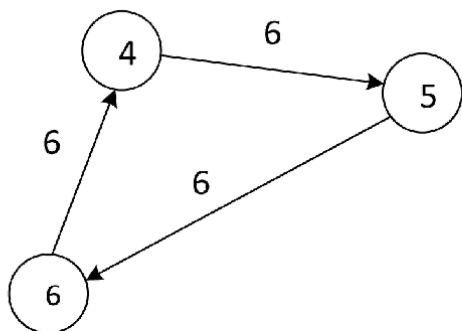


Рис. 5. Ориентированный цикл № 3 для примера расчета

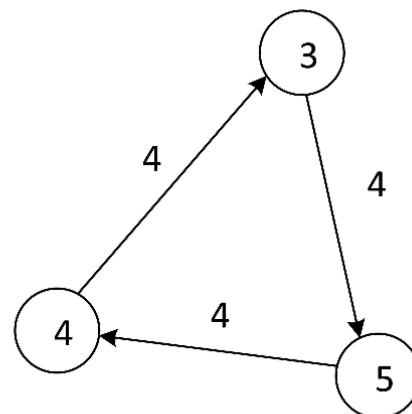


Рис. 6. Ориентированный цикл № 4 для примера расчета

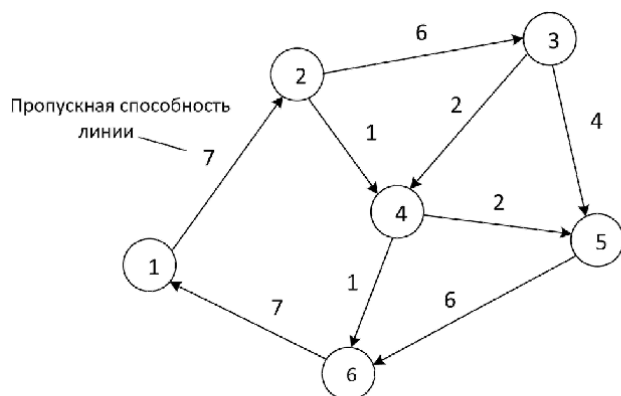


Рис. 7. Структура ТС, полученная в результате объединения ориентированных циклов № 1, № 2, № 3 и № 4

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

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

Результатом работы рассмотренного алгоритма определения резервных пропускных способностей линий передачи ТС ТКС является полученные значения резервных пропускных способностей линий передачи, то есть  $U_{\text{рез.}} = \{u_{ij}^{\text{рез.}}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ .

Дальнейшим направлением исследований подходов к поиску МЗС будет создание алгоритмов логического выделения структур защитных контуров с определением пропускной способности каждого контура, которые позволят в полном объеме реализовать МЗС для ТС ТКС. При этом важно учесть экономическую целесообразность использования МЗС, которая превосходит

резервирование р-циклом до 15%, а резервирование методом 1+1 – до 22% [5]. Реализация и внедрение МЗС позволит не только существенно снизить затраты на организацию резерва, но и сохранить высокую скорость переключения на резерв, что является немаловажным фактором, учитывающим возможность увеличения передаваемого трафика в ТС ТКС.

### 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. Соколов, В. М. Методика синтеза структуры транспортной сети телекоммуникационной системы распространения геоинформации / В.М. Соколов, С.А. Ясинский // Информация и Космос. – 2012. – № 1. – С. 15–17.
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.