

Подход к поиску отказоустойчивой структуры транспортной сети телекоммуникационной системы на основе р-циклов

Approach to Search for a Fault-Tolerant Structure of the Transport Network Telecommunication System on the Basis of p-cycles

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

Лыжинкин / Lyzhinkin K.

Константин Владимирович

(lkv@loniis.ru)

Филиал ФГУП ЛО ЦНИИС,

начальник научно-технического центра.

г. Санкт-Петербург

Грязев / Gryazev A.

Андрей Николаевич

(agryazev@zniis.ru)

кандидат технических наук.

ФГУП ЦНИИС,

генеральный директор.

г. Москва

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть – transport network; отказоустойчивая структура – fault-tolerant structure; р-цикл – p-cycle; поиск структуры – search for the structure.

Рассматривается подход к поиску отказоустойчивой структуры на основе р-циклов для транспортной сети телекоммуникационной системы. Приводятся условия физической реализуемости задачи поиска и особенность выделения сетевого резерва для р-цикла.

The paper addresses approach to search for fault-tolerant structure on the basis of p-cycles for the transport network of the telecommunication system. There are given conditions of physical implementation of the search task and peculiarities of allocation of the network reserve for the p-cycle.

Современные транспортные сети (ТС) телекоммуникационных систем (ТКС) имеют высокую пропускную способность. Следовательно, любые повреждения структуры ТС ТКС приводят к огромным потерям передаваемого информационного трафика. При этом создание структурно надежных ТС предполагает формирование высокосвязных топологических структур. Однако в настоящее время нет четких механизмов сетевого резервирования для таких сетей. Поэтому для структур с высокой связностью предлагают применять резервирование линейного тракта (секций мультиплексирования) или соединения (тракта высокого или низкого порядка, оптических каналов, виртуальных соединений при пакетной передаче), которое реализуется или методом 1+1 или резервированием методами самовосстанавливающихся колец, декомпозируя сеть на сегменты взаимосвязанных кольцевых структур. Однако это вызывает неоправданные затраты на резервиро-

вание и восстановление линейных трактов и потоков и приводит к неэффективному использованию сетевого резерва [1].

При этом в последнее время рассматриваются альтернативные подходы к решению задачи резервирования на высокосвязных топологических структурах. Наиболее перспективным и технически целесообразным вариантом разрешения этой проблемы признается механизм резервирования на основе p -циклов (p -cycle, то есть *preconfigured protection cycle*) [2, 3].

Концепция заранее сконфигурированных защитных контуров (циклов) была предложена в конце 90-х годов и получила название механизма резервирования на основе p -циклов [2,3]. В настоящее время эта концепция находит все большее применение на европейских сетях связи.

Суть механизма резервирования на основе p -циклов заключается в выделении на высокосвязной топологической структуре замкнутого контура или цикла с предварительно рассчитанной резервной пропускной способностью, которая будет использоваться в случае возникновения отказа в сети связи. Пример структуры ТС для описания работы p -цикла при повреждении на защитном ребре, входящем в контур с резервной пропускной способностью, представлен на рисунке 1. Пример структуры ТС для описания работы p -цикла при повреждении на защищаемом ребре, не входящем в контур с предварительно рассчитанной пропускной способностью, представлен на рисунке 2.

Поиск структуры p -цикла заключается в нахождении функционально замкнутого контура, проходящего

через все узлы и имеющего наименьшую протяженность на сети связи [3]. Подобная задача сводится к широко известной задаче поиска Гамильтонова цикла (ГЦ), а содержательно эта задача поиска p -цикла формулируется следующим образом.

На заданной топологической структуре ТС, которая характеризуется простым ненаправленным графом $G = \{A, B\}$, где 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 число линий передачи между этими узлами, на котором определена матрица весов в виде их длин $L = \{l_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$. Требуется найти замкнутый контур $C = \{c_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ с минимальным весом пути, проходящем через все вершины графа $G = \{A, B\}$ один раз:

$$\sum_{\substack{i, j = \overline{1, N} \\ i \neq j}}^N c_{ij} l_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } p\text{-цикл проходит через ребро } b_{ij}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, решением задачи будет определение множества ребер ТС, образующих множество $C = \{c_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ в виде ГЦ.

Относительно математической формулировки задачи поиска p -цикла необходимо сделать ряд замечаний:

– весовые коэффициенты для множества ребер должны быть неотрицательными

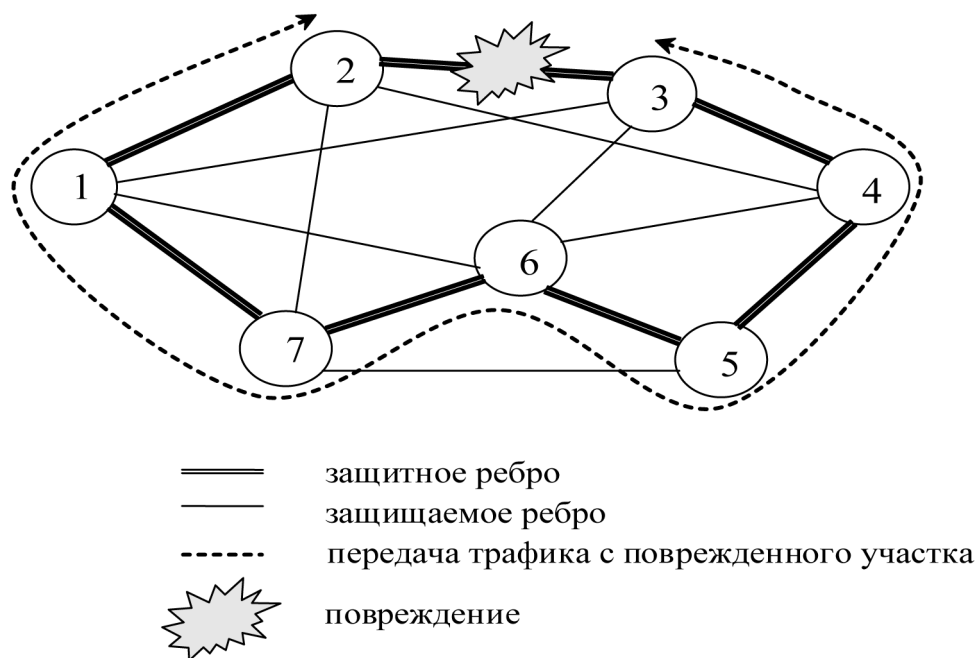
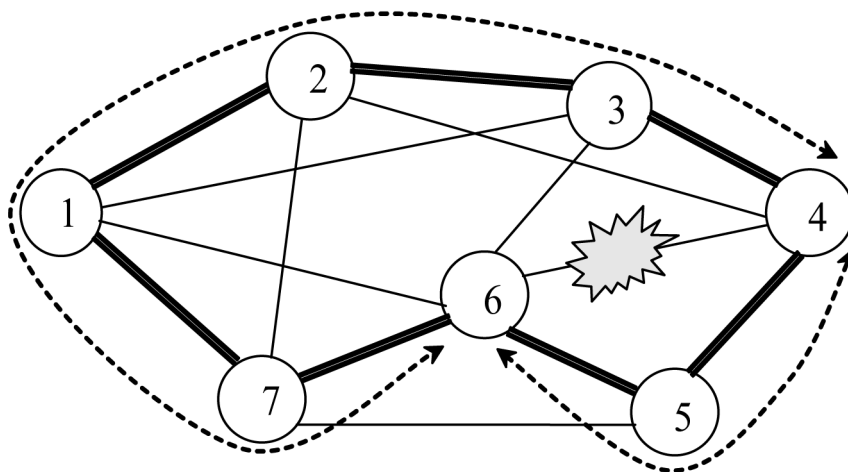


Рис. 1. Пример структуры ТС для описания работы p -цикла, при повреждении на защитном ребре



- защитное ребро
- защищаемое ребро
- передача трафика с поврежденного участка
- повреждение

Рис. 2. Пример структуры ТС для описания работы p -цикла, при повреждении на защищаемом ребре

$$l_{ij} \geq 0; \quad i, j = \overline{1, N}; \quad (3)$$

– весовые коэффициенты для множества ребер должны быть симметричными

$$\forall i, j = \overline{1, N}, \quad l_{ij} = l_{ji}; \quad (4)$$

– весовые коэффициенты должны удовлетворять неравенству треугольника

$$\forall i, j = \overline{1, N}, \quad l_{ij} + l_{jk} \geq l_{ik}; \quad k = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Исходя из экономических соображений, матрицу весов целесообразно составить из матрицы расстояний, которая в свою очередь должна удовлетворять условиям (3–5).

Однако не все графы содержат ГЦ [4,5]. Следовательно, прежде чем приступить к поиску p -цикла, необходимо установить условия его реализуемости. В настоящее время не найдены действительно адекватные условия для графа, позволяющие судить с полной

уверенностью о наличии в нем ГЦ. Тем не менее, можно всегда определить класс графов, существование ГЦ в которых невозможно. Следовательно, в виде свойства определим наиболее очевидное необходимое условие существования ГЦ в графе для ТС.

Свойство. Простой ненаправленный граф G на N вершинах может иметь p -цикл, если каждая вершина графа G будет инцидентна двум и более ребрам графа G , то есть

$$\forall C \in G(A, B), \quad \rho(a_i) \geq 2, \quad i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где $\rho(a_i)$ – ранг вершины.

Доказательство свойства основывается на определении p -цикла (ГЦ), то есть простого контура, включающего каждую вершину графа ровно один раз. Простым контуром называется путь, у которого начальная и конечная вершина совпадают и ни одна из вершин не инцидентна более чем двум входящим в нее ребрам, т.е.

$$\rho(a_i) = 2, \quad \forall C \in G(A, B), \quad i = \overline{1, N}. \quad (7)$$

Соответственно, контур не может существовать, если хотя бы одна его вершина инцидентна только

одному ребру. Следовательно, в простом ненаправленном графе может существовать ГЦ тогда и только тогда, когда каждая вершина инцидентна двум и более ребрам графа.

Полученное выше свойство необходимо использовать на предварительном этапе поиска p -цикла для того, чтобы в дальнейшем не рассматривать заведомо нереализуемые решения.

Задача поиска ГЦ относится к классу комбинаторных NP -полных оптимизационных задач. Анализ методов решения задачи поиска ГЦ свидетельствует о целесообразности использования алгоритма Литтла для поиска p -цикла на первом этапе [4, 5].

Решением алгоритма Литтла будет либо искомым p -цикл, либо вывод о том, что в представленном графе p -цикла не существует. Это связано с тем, что иногда на сети невозможно найти p -цикл, проходящий через все узлы и, соответственно, защищающий все ребра ТС. В этом случае выбирают приоритетные направления для защиты трафика и вносят изменения в граф, описывающий топологическую структуру ТС, т.е. вычеркивают узлы с низким приоритетом вместе с инцидентными им ребрами.

Второй этап поиска p -цикла заключается в расчете сетевого резерва, т.е. пропускной способности, которая будет обеспечивать восстановление всех защитных и защищаемых ребер. Исходя из особенностей работы p -цикла, пропускные способности линий передачи ТС должны быть примерно одинаковыми, в этом случае использование p -циклов для резервирования является более эффективным и целесообразным. Однако потоковые структуры реальных ТС ТКС не всегда возможно привести к одинаковым значениям пропускных способностей. В этом случае сетевой резерв будет обладать избыточностью, которая в свою очередь будет зависеть от степени неоднородности потоковой структуры ТС. При этом сетевой резерв ($U_{рез.}$) ТС будет рассчитываться следующим образом:

$$U_{рез.} = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N c_{ij} \times U_{max}, \quad (8)$$

где $U_{max} = \max \left\{ U_{ij}^c, \frac{U_{ij}^{\bar{c}}}{2} \right\}$ – максимальное из максимальных значений пропускной способности ребер, входящих в p -цикл (U_{ij}^c), или половина от максимального значения пропускной способности ребер, не входящих в p -цикл ($U_{ij}^{\bar{c}}$).

Важно отметить, что рассмотренная концепция p -циклов позволяет сохранять работоспособность ТС при одиночном повреждении на защитном ребре или двойном повреждении на защищаемых ребрах, при этом будет передано 100% защищаемого сетевого трафика.

Таким образом, рассмотрен подход к поиску p -цикла на ТС, а также ключевые условия физической реализуемости и особенность выделения сетевого резерва

для p -цикла. Использование рассмотренного механизма организации резервирования позволит существенно снизить затраты на организацию и содержание сетевого резерва, а также значительно повысить коэффициент использования высокоскоростной транспортной ТКС.

Литература

1. Зюзин, А. Н. Современные механизмы резервирования и восстановления транспортных сетей связи / А.Н. Зюзин, И.С. Каминецкий // Электросвязь. – 2005. – № 7. – С. 18–21.
2. New option and insights for survivable transport networks / W.D. Grover [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2002, January. – P. 34–41.
3. Зюзин, А. Н. Использование p -циклов для формирования сетевого резерва на транспортных сетях связи / А.Н. Зюзин, И.С. Каминецкий // Труды учебных заведений связи. – 2005. – № 173. – С. 59–67.
4. Сергиенко, М. В. Модели и методы решения на ЭВМ комбинаторных задач оптимизации / М.В. Сергиенко, М.В. Каспицкая. – Киев: Наукова думка, 1981. – 288 с.
5. Алгоритм решения задачи о коммивояжере / Дж. Литл [и др.] // Экономика и математические методы. – 1965. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 94–107.