

Подход к модернизации топологии транспортной сети связи на основе кольцевых структур

Approach to modernization of the topology of the transport communication network based on ring structures

Ясинский / Yasinsky S.

Сергей Александрович

(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.

Филиал ФГУП «Ленинградское

отделение центрального научно-исследовательского института связи»,

научный консультант.

г. Санкт-Петербург

Зюзин / Zyuzin A.

Александр Николаевич

(alexz01@bk.ru)

кандидат технических наук.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного»,

преподаватель.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть связи – transport communication network; модернизация – modernization; топологическая структура – topological structure; задача коммивояжера – traveling salesman problem; метод ветвей и границ – branch and limit method.

В статье описывается подход к модернизации фрагмента транспортной сети связи на основе кольцевых структур. Для поиска замкнутого контура на частично определенной топологии сети предлагается модифицировать известный метод ветвей и границ.

The article describes the approach to modernization of the fragment of the transport communication network based on ring structures. To search for a closed loop on a partially defined network topology, it is proposed to modify the known branch and limit method.

Введение

Современное общество активно развивается в направлении цифровой трансформации. Активно внедряются элементы искусственного интеллекта (интеллектуальное видеонаблюдение, оповещение, системы контроля и управления дорожным движением и т. д.), используются новые подходы к автоматизации бизнес-процессов (автоматизированные и робототехнические комплексы, чат боты, базы знаний и т. д.), внимательно изучается аналитика больших объемов данных (данные социальных медиа, интернета вещей и т. д.). Эти процессы ведут к увеличению потребности в получении и обработке больших объемов информации. Очевидно, что обеспечить передачу и обработку постоянно увеличивающихся объемов информации

может только построение соответствующей информационной инфраструктуры (современных сетей связи (СС), центров обмена данными и т. д.).

Современные СС, в свою очередь, играют роль транспортной составляющей информационной инфраструктуры, которая обеспечивает гарантированный, достоверный и безопасный перенос больших объемов информации между ее элементами. Решение ключевых задач по увеличению объема и качества передачи информации в современных СС возможно только путем масштабной модернизации их первичных и транспортных сетей связи (ТрСС) [1].

Очевидно, что ТрСС в значительной мере определяют потенциальные возможности развития и реально достижимые показатели функционирования СС. ТрСС являются консервативными и технически сложными системами, которые обладают большой протяженностью и разветвленностью. Модернизация и развитие ТрСС подразумевает использование существующих кабельно-линейных сооружений связи во взаимосвязи с построением новых участков [2]. Известно, что топологически структуры современных ТрСС целесообразно образовывать на базе замкнутых контуров (колец) до 10–12 узлов, которые реализуют возможности современных механизмов резервирования в части обеспечения требуемой устойчивости [3, 4]. Следовательно, для определения топологии модернизируемых участков ТрСС требуется разработка соответствующего методического аппарата, который сможет учитывать возможность использования существующих кабельно-линейных сооружений и строительство новых с минимальной протяженностью. При этом полученные топологические структуры модернизируемых участков ТрСС должны образовывать кольцевые структуры для обеспечения повышенных требований по устойчивости к СС [3].

Постановка задачи определения топологии модернизируемого участка ТрСС на основе кольцевых структур

Для оценки возможности разработки методического аппарата модернизации топологии ТрСС рассмотрим задачу поиска кольцевой структуры в виде известной задачи поиска замкнутого контура или Задачи коммивояжера (ЗК), которая заключается в поиске замкнутого контура $C = \{c_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ на простом не направленном графе $G = \{A, B\}$, где: множество вершин графа $A = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ соответствует известному множеству узлов ТрСС; множество ребер графа $B = \{b_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ описывает существующие линии связи между узлами связи; N – количество узлов в сети связи. Кроме того, должна быть определена матрица весов $L = \{l_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$, которая соответствует расстояниям между узлами сети. Полученный замкнутый контур $C = \{c_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ должен иметь минимальную протяженность и проходить через все вершины графа один раз, то есть:

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

при

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ребро входит в контур } C; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

При определении топологии на модернизируемом участке ТрСС известная ЗК будет иметь некую особенность, которая заключается в том, что поиск замкнутого контура будет производиться на известной узловой основе (множество вершин графа $A = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ известно) и частично определенной структуре сетки линий – существующих кабельно-линейных сооружений связи. В этом случае $B \subset C$, но $B \neq C$. При решении этой задачи важно понимать, что 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.

$$\rho(a_i) = 2, \forall C(l_{ij}) \in G(A, B), i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где $\rho(a_i)$ – ранг вершины.

Соответственно, ни одна из вершин $A = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ графа $G = \{A, B\}$ не должна быть инцидентна более чем двум входящим в нее существующим ребрам из множества $B = \{b_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$. Если ранг какой-либо вершины на модернизируемом фрагменте сети больше двух, то следует исключить из рассмотрения одно из ребер вершины (целесообразнее убрать ребро минимальной длины) или изменить размер модернизируемого участка ТрСС. Изменение размера участка ТрСС необходимо осуществлять таким образом, чтобы

«лишние» ребра не учитывались при решении текущей задачи модернизации, а ранг вершин в рассматриваемом фрагменте не превышал двух. В дальнейшем исключенные из рассмотрения ребра могут учитываться при модернизации соседних участков ТрСС.

Таким образом, задача определения топологии модернизируемого участка ТрСС будет заключаться в поиске дополнительных ребер минимальной протяженности для графа $G = \{A, B\}$, которые вместе с существующими ребрами $B' = \{b'_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ составят замкнутый контур $C = \{c_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$.

Подход к решению задачи определения топологии модернизируемого участка ТрСС на основе кольцевых структур

Известно, что для решения ЗК можно использовать различные известные алгоритмы: «жадный» алгоритм, «деревянный» алгоритм, алгоритм минимального остовного дерева и др. [5]. Наиболее эффективным методом решения ЗК признается метод ветвей и границ. Следовательно, предлагается доработать метод ветвей и границ с учетом специфики модернизации ТрСС. На начальном этапе из определенной матрицы весов (расстояний между узлами связи) $L = \{l_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ удаляются строки и столбцы, соответствующие существующим ребрам $B' = \{b'_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$. Поскольку эти линии связи имеются в наличии, то дополнительного строительства не предполагают. Далее, на скорректированной матрице весов решается задача поиска оставшихся элементов контура известным методом ветвей и границ. Укрупненная блок-схема решения задачи поиска топологической структуры модернизируемого участка ТрСС представлена на рис. 1.

Пример решения задачи определения топологии модернизируемого участка ТрСС на основе кольцевых структур

Для оценки адекватности предложенного подхода к решению задачи определения топологии модернизируемого участка ТрСС на основе кольцевых структур рассмотрим пример расчета для структуры фрагмента сети, представленного на рис. 2, который характеризуется матрицей расстояний (таблица 1).

1. Будем считать, что линии связи (3–5) и (6–7) уже существуют. Проверим их по условию минимальной инцидентности для существующих ребер и вершин. Структура фрагмента сети на рис. 2 соответствует этому условию.

2. Определим верхнюю границу для поиска, для чего выберем произвольный контур с учетом существующих линий, например (3–5), (7–6), (1–2), (2–3), (5–4), (4–6) и (7–1). Суммарный весовой коэффициент этого контура $3+6+16+8+6+4+10=53$. Это значение будет являться верхней границей, а весовой коэффициент оптимального контура не должен ее превосходить.

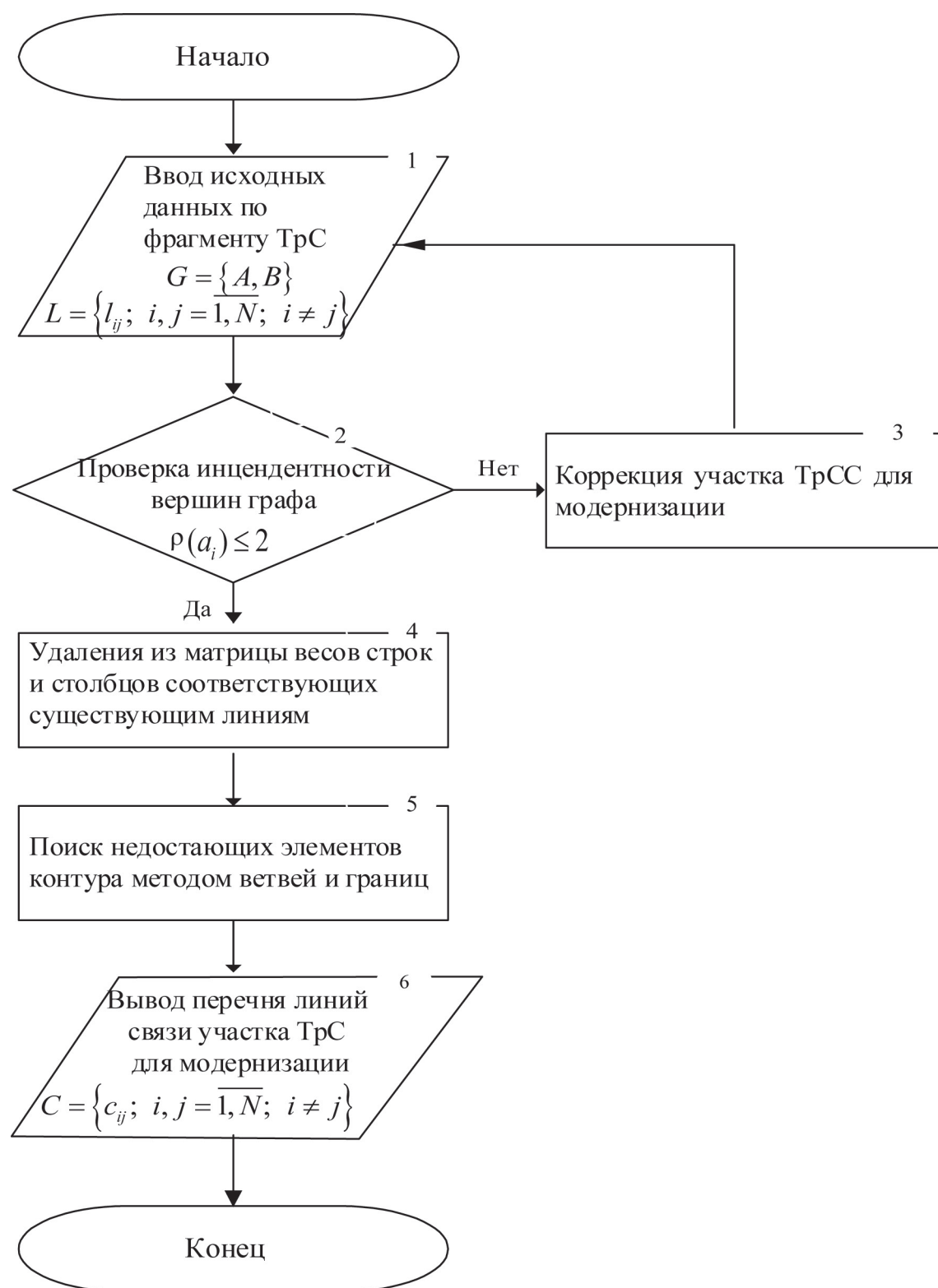


Рис. 1. Блок-схема решения задачи поиска топологической структуры модернизируемого участка ТрСС

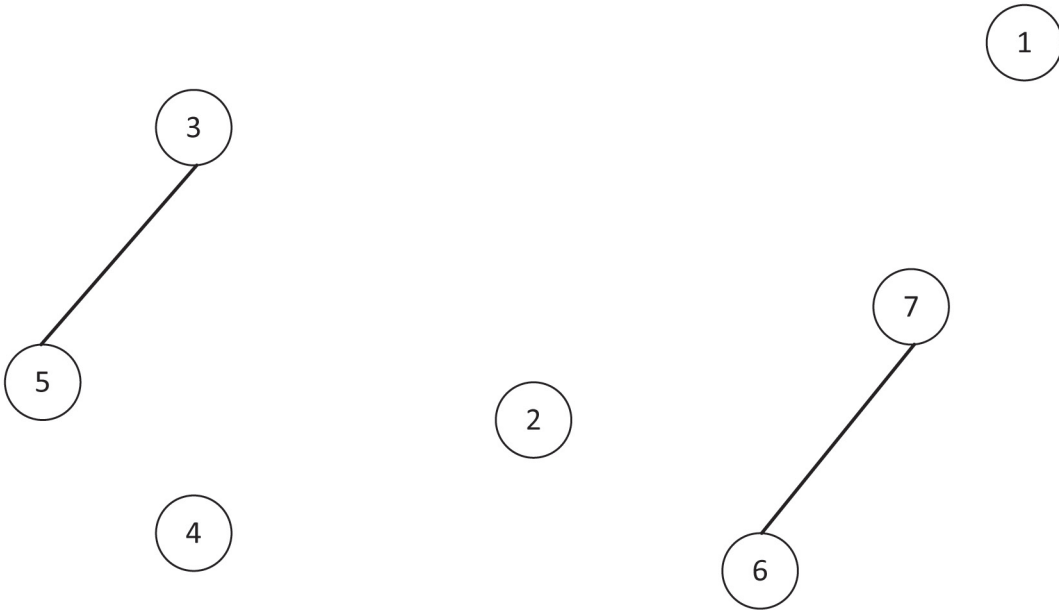


Рис. 2. Структура фрагмента сети для примера расчета

Таблица 1

Матрица расстояний

Узел	1	2	3	4	5	6	7
1	-	16	19	19	21	16	10
2	16	-	8	3	7	4	6
3	19	8	-	9	3	11	12
4	19	3	9	-	6	4	9
5	21	7	3	6	-	10	12
6	16	4	11	4	10	-	6
7	10	6	12	9	12	6	-

Таблица 2

Скорректированная матрица расстояний с учетом известных элементов контура

Узел	1	2	4	5	7
1	-	16	19	21	10
2	16	-	3	7	6
3	19	8	9	-	12
4	19	3	-	6	9
6	16	4	4	10	-

Таблица 3

Скорректированная матрица расстояний с учетом операции редукции строк и столбцов

Узел	1	2	4	5	7	Конст.
1	-	6	9	8	0	10
2	2	-	0	1	3	3
3	0	0	1	-	5	8
4	5	0	-	0	6	3
6	1	0	0	3	-	4
Конст.	11	0	0	3	0	42

Таблица 4

Матрица оценки вторичного максимального штрафа для каждого нулевого элемента в строке и столбце

Узел	1	2	4	5	7	Конст.	Штраф
1	-	6	9	8	0	10	6
2	2	-	0	1	3	3	1
3	0	0	1	-	5	8	0
4	5	0	-	0	6	3	0
6	1	0	0	3	-	4	0
Конст.	11	0	0	3	0	42	
Штраф	2	0	1	0	1		

Таблица 5

Матрица весов с учетом выбранного элемента контура

Узел	1	2	4	5	Конст.	Штраф
2	2	-	0	1	0	1
3	0	0	1	-	0	0
4	5	0	-	0	0	0
6	-	0	0	3	0	0
Конст.	0	0	0	0	0	
Штраф	2	0	0	1		

Таблица 6

Матрица весов с учетом
выбранного следующего элемента контура

Узел	2	4	5	Конст.	Штраф
2	-	0	1	0	1
4	0	-	0	0	0
6	0	0	-	0	0
Конст.	0	0	0	0	
Штраф	0	0	1		

Таблица 7

Матрица весов с учетом
выбранного последнего элемента контура

Узел	2	5	Конст.	Штраф
4	0	0	0	0
6	0	-	0	-
Конст.	0	0	0	
Штраф	0	-		

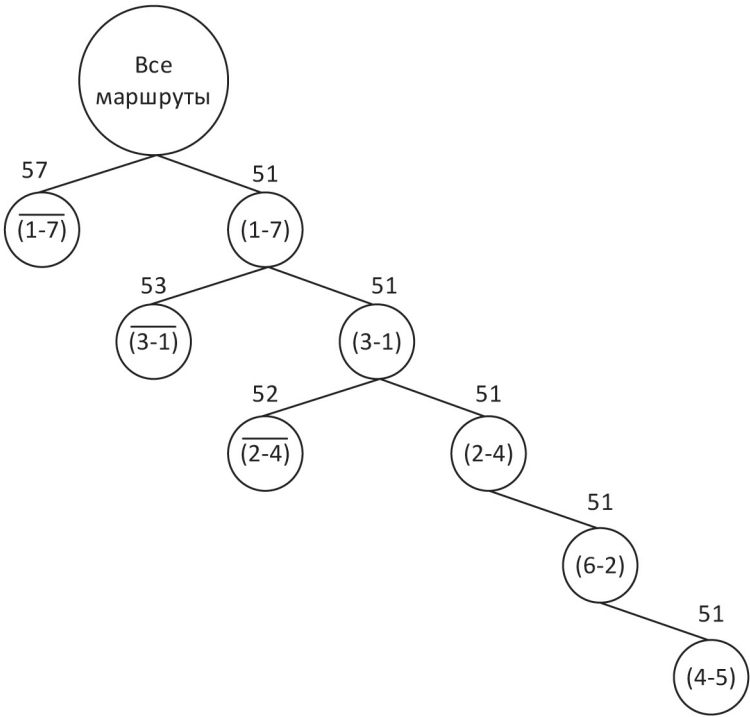


Рис. 3. Дерево промежуточных решений для примера расчета

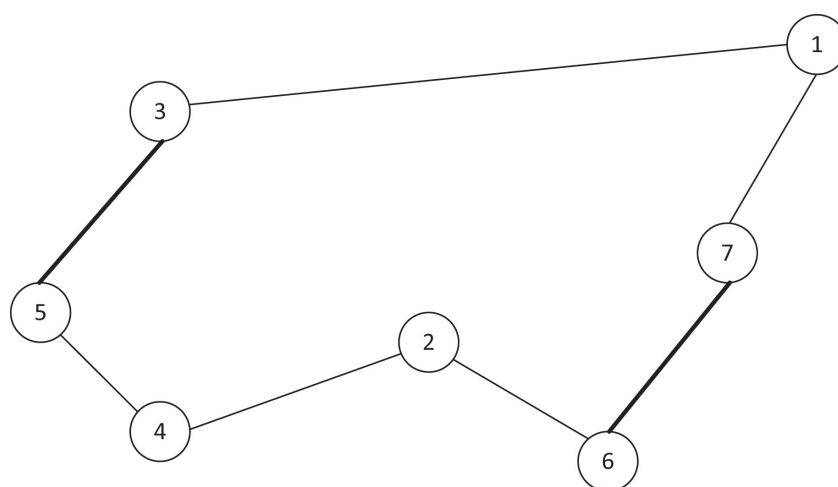


Рис. 4. Структура оптимального замкнутого контура для примера расчета

3. Скорректируем матрицу весов с учетом известных элементов контура. Удаляем столбцы 3 и 6, а также строки 5 и 7. Определяем запретные ребра, с помощью которых могут образоваться циклы, включающие в себя не полные множества пунктов (замкнутые подмаршруты). Это ребра (5–3) и (6–7). Скорректированная матрица расстояний будет иметь вид, приведенный в таблице 2.

4. Выполним операцию редукции строк и столбцов. Для этого определяется минимальный элемент в строке, а значение найденного элемента вычитается из всех элементов строки. Такая процедура выполняется сначала со всеми строками, а затем со всеми столбцами. Вычитаемые из строк и столбцов константы суммируются. Скорректированная матрица с учетом выполненных операций и с найденными минимальными элементами будет иметь вид, приведенный в таблице 3. Сумма вычитаемых констант составит 42. Это значение вместе с суммой весовых коэффициентов, уже определенных для ребер (3–5) и (6–7), будет являться нижней границей. Таким образом, весовой коэффициент оптимального контура будет находиться в диапазоне значений от 51 до 53.

5. Выберем звено, на котором будет базироваться ветвление. Для этого оценим вторичный максимальный штраф [5] для каждого нулевого элемента (следующее минимальное значение) в строке и столбце для полученной матрицы (таблица 4). Максимальный вторичный штраф равен 6 при использовании нулевого элемента (1–7). Выберем его в качестве базового элемента ветвления.

6. Скорректируем матрицу весов с учетом выбранного элемента контура. Удаляем столбец 7 и строку 1. Исключим запретные ребра (6–1). Выполним операцию редукции строк и столбцов и оценим вторичный штраф. Получим скорректированную матрицу (таблица 5). Сумма вычитаемых констант будет нулевой. Нижняя граница

не изменится. Максимальный вторичный штраф определен для ребра (3–1), который выберем в качестве следующего базового элемента ветвления.

7. Скорректируем матрицу весов с учетом выбранного следующего элемента контура. Удаляем столбец 1 и строку 3. Исключим запретные ребра (6–5). Выполним операцию редукции строк и столбцов и оценим вторичный штраф. Получим скорректированную матрицу (таблица 6). Сумма вычитаемых констант будет нулевой. Нижняя граница не изменится. Максимальный вторичный штраф определен для ребра (2–4), который выберем в качестве следующего базового элемента ветвления.

8. Скорректируем матрицу весов с учетом выбранного последующего (последнего) элемента контура. Удаляем столбец 4 и строку 2. Получим скорректированную матрицу – таблица 7. Следующим элементом ветвления будет ребро (6–2), а затем (4–5).

Следовательно, дерево промежуточных решений для примера расчета будет иметь вид, представленный на рис. 3. Оптимальный маршрут состоит из дополнительных ребер (4–5), (6–2), (2–4), (3–1), (1–7) и существующих ребер (3–5) и (6–7). Структура оптимального замкнутого контура для примера расчета приведена на рис. 4, а полученный результат расчета подтверждает работоспособность предложенного подхода к решению задачи определения топологии модернизируемого участка ТрСС на основе кольцевых структур.

Заключение

Таким образом, рассмотренный пример расчета подтверждает работоспособность предложенного подхода к решению задачи определения топологии сети на основе кольцевых структур. Этот подход целесообразно использовать при модернизации ТрСС с учетом существующих линий связи. При этом использование

метода ветвей и границ для небольшой размерности решаемых задач (от 10 до 12 узлов связи) позволяет в доступной степени автоматизировать процесс расчета [6].

Литература

1. Грязев, А. Н. Многослойная графовая модель для модернизации и развития транспортных сетей связи / А.Н. Грязев, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Вестник связи. – 2018. – № 5. – С. 13–16.
2. Грязев, А. Н. Методы развития транспортных сетей связи для цифровой экономики РФ / А.Н. Грязев, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Вестник связи. – 2018. – № 2. – С. 19–22.
3. Зюзин, А. Н. Совершенствование систем сетевого резервирования транспортной сети магистрального оператора связи / А.Н. Зюзин, И.С. Каминецкий // Электросвязь. – 2005. – № 11. – С. 18–21.
4. Grover, W. D. New option and insights for survivable transport networks / W.D. Grover // IEEE Communications Magazine. – 2002, January. – P. 34–41.
5. Грешилов, А. А. Математические методы принятия решений: учеб. пособие / А.А. Грешилов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 647 с.
6. Леоненков, А. В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 704 с.