

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В статье рассматриваются вопросы проектирования устойчивых к внешним воздействиям телекоммуникационных сетей на основе метода многокритериальной оптимизации по Парето. Разработанный метод позволяет находить оптимальные основные и резервные пути в сети с учетом совокупности показателей качества.

Ключевые слова: оптимизация, многокритериальность, Парето-множество, устойчивая сеть, основной путь, усовершенствование решений.

ВВЕДЕНИЕ

Живучесть телекоммуникационной сети (ТКС), как единой информационной системы, является основной целью процесса ее проектирования. Соответственно, актуальным является разработка алгоритмов обеспечения живучести ТКС. Для обеспечения своевременной доставки информационных пакетов необходимо иметь в «горячем» резерве дополнительное множество путей при случае поломки основных. При этом дополнительные пути должны иметь некий рассчитанный приоритет.

Основные работы по данной тематике [1–2] посвящены вопросам реализации алгоритмов предотвращения потерь пакетов в сетях с изменяющейся структурой; при этом не учитывается совокупность показателей качества QoS. Некоторые работы [3–4] непосредственно посвящены тематике данной статьи, однако не преследуют цель рассмотрения указанной проблемы с многокритериальных позиций.

В данной статье внимание сосредоточено на одновременное выделение как основных, так и резервных путей в ТКС. При этом формулируется проблема многокритериальной оптимизации топологии сети по нескольким показателям: минимизации стоимости сети, сведения к минимуму связей между основными и ре-

зервными путями в процессе нормального функционирования сети, максимизации количества связей между путями резервного копирования в случае поломки основных путей ТКС. Также учитывается, что поломка на границе сети может повлиять только на один основной путь, что позволяет использовать лишь один резервный путь.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Учитывая все возрастающие скоростные и надежность требования к ТКС, для поддержания живучести сети необходимо иметь в наличии определенное множество резервных путей, которые могут быть использованы в процессе маршрутизации и передачи трафика. Необходимо предопределять резервный путь (пути), если:

- после восстановления гарантирована полная рабочая пропускная способность;
- восстановление проходит практически мгновенно (30–60 мс).

В работе делается допущение, что в ТКС не может произойти более чем фиксированное число поломок основных путей.

В качестве модели рассматриваются:

- двунаправленный граф $G = (V, E)$;
- матрица смежности;

- пропускная способность каждого канала n ;
- стоимость каждого канала c ;
- пара источник – получатель $(s, d) \in V$ (или набор пар $(s_i, d_i), i = 1, \dots, N, N \geq 1$, в общем случае) и набор требований;
- целевые функции.

Целевые функции, разработанные для минимизации стоимости пути между парами узлов, а также обеспечения равномерной сетевой загрузки ТКС, приведены ниже.

Целевая функция 1. Минимизировать общую стоимость путей (основных и резервных) между источником и получателем:

$$\min \sum_{i=1}^N c(\text{основные пути}(s_i, d_i)) + \sum_{i=1}^N c(\text{резервные пути}(s_i, d_i)). \quad (1)$$

Целевая функция 2. Предположим поломку в сети; в целях обеспечения живучести надо убедиться, что резервный канал имеется в наличии. Однако, необходимо убедиться также в том, что основной канал не является частью резервного. Данная задача формализуется с помощью следующего критерия: минимизации связей между основными и резервными путями

$$\min \sum_{i=1}^N \text{общие границы (основные пути}(s_i, d_i), \text{резервные пути}(s_i, d_i)). \quad (2)$$

Целевая функция 3. Данная целевая функция используется для максимизации общих связей между путями резервного копирования и имеет следующий вид:

$$\max \sum_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^N \text{общие границы (резервные пути}(s_i, d_i), \text{резервные пути}(s_j, d_j)). \quad (3)$$

Очевидно, что рассматриваемые целевые функции связаны друг с другом, что приводит к задаче многоцелевой (многокритериальной) оптимизации [5–6]. Существует несколько способов решения многокритериальных задач. Одними из распространенных являются весовой метод, в котором оптимальные проектные решения находятся путем оптимизации взвешенной суммы частных целевых функций, и метод Парето-предпочтения, который использует стандартный Парето подход к нахождению оптимальных решений.

Пусть x, y – два вектора решения с множества всех возможных решений. Решение x является предпочтительнее y (также записывается $x \succ y$), если и только если выполняются следующие условия:

$$f_i(x) \geq f_i(y); \forall i = 1, 2, \dots, n; \\ \exists j \in [1, 2, \dots, n] : f_j(x) > f_j(y).$$

Согласно аксиоме Парето в многокритериальных задачах оптимизации бинарное отношение \geq играет важную роль. Поэтому множество оптимальных оценок по отношению \geq имеет специальное название: множество Парето-оптимальных (оптимальных по Парето) или эффективных оценок.

При оптимизации с помощью метода взвешенной суммы используется выражение следующего типа:

$$\Phi = \left\{ \arg \text{extr} [\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \dots + \lambda_i f_i] \right\}, \quad (4)$$

в котором весовые коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ выбираются из условия $\lambda_i > 0, \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$. Множество Парето-оптимальных решений содержит те варианты, которые удовлетворяют условию (4) при разных допустимых комбинациях весовых коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$.

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА

В данном разделе описан предложенный метод многокритериальной оптимизации. В предложенной модели решение представляет собой множество основных путей вместе с соответствующими им резервными путями. Например, если в наличии имеется 2 узла-источника и 2 узла-получателя, то задачей проектирования является нахождение 4 основных путей, а также 4 резервных. Оптимальное множество в данном случае представляет собой совокупность 8 полученных путей.

Для получения решения строится множество всех допустимых путей между узлами ТКС. Для каждой пары узлов формируется набор основных и резервных путей; это делается на основе случайной выборки. Множество оптимальных решений генерируется и изменяется в процессе итерационного оптимизационного процесса.

1. ПОИСК РЕШЕНИЙ

Для построения пути необходимо выполнить следующие шаги:

Шаг 1. Положить узел-источник как текущий узел.

Шаг 2. Если существует непосредственный путь (канал) с текущего узла в узел-получатель, то перейти в узел-получатель. В противном случае случайно выбрать следующий узел, смежный с текущим, и положить его текущим на следующей итерации алгоритма.

Шаг 3. Если текущий узел является узлом-получателем, то остановить процесс поиска. В противном случае перейти к шагу 2.

Также берутся во внимание следующие ограничения:

- каждый узел может быть использован только единожды при поиске пути;
- если текущий узел «тупиковый» (из него нельзя попасть в другой неиспользованный узел), то процесс поиска решений прерывается.

2. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕШЕНИЙ

Есть три пути усовершенствования полученных решений. Применяя методику усовершенствования напрямую к определенному решению либо комбинации двух (или более) решений, можно обновить множество полученных путей. Для первого случая решение может быть усовершенствовано следующим образом:

1. Построить заново путь с заданного узла.
2. Заменить существующий путь другим из начального множества.

Несколько решений, которые могут быть объединены, должны иметь как минимум 3 общих узла (включительно с начальным и конечным узлом).

Первый подход к усовершенствованию

В целях усовершенствования решений, используя процедуру, описанную выше, изменения существующих путей выполняются следующим образом:

- один основной путь случайно выбирается из множества инициализированных. Из этого пути случайным образом выбирается определенный узел. Из данного узла формируется новый путь к узлу-получателю, который отличается от уже существующего основного пути;
- для резервного пути процедура идентична.

Второй подход к усовершенствованию

Другой подход к усовершенствованию решения заключается в замене всего пути (основного либо резервного) на другой из инициализированного исходного множества. Данные шаги усовершенствования повторяются для каждой итерации алгоритма. При этом несравнимые между собой пути образуют специальное множество рассматриваемых решений.

Рассматриваемые решения сравниваются с предыдущими модифицированными решениями. Для выбора оптимального решения используется Парето-предпочтение таким образом:

- если рассматриваемое решение предпочтительнее модифицированного, то решение оптимальное;
- если модифицированное решение предпочтительнее рассматриваемого, то решение оптимальное;
- если решения несравнимы, то используется любое из них.

Третий подход к усовершенствованию

Два пути с двух разных решений могут быть объединены, если они имеют минимум 3 общих узла (включительно начальный и конечный узел). Например, мы имеем пути:

2-7-9-4-3-8-1-5
2-8-11-9-6-5

Легко заметить, что пути содержат 2 общих узла: 8 и 9. Возможная комбинация представленных путей образует 2 новых пути:

2-7-9-6-5
2-8-11-9-4-3-8-1-5

Коррекция полученных путей, в основном, состоит из удаления циклов, например, 8-11-9-4-3-8.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Рассмотрим пример ТКС, представленный на рис. 1. В данной модели имеются 2 узла-источника (узел 1 и узел 8), а также 2 узла-получателя (узел 5 и узел 13). Цель проектирования – найти два оптимальных основных пути и два резервных, исходя из (1-3).

Было определено исходное множество путей между узлами 1 и 5, а также узлами 8 и 13. Из данного множества случайным образом был выбран первоначальный набор решений:

1-3-11-8-9-10-12-13-6-5
1-3-4-5
1-7-3-2-9-8-10-12-13-11-6-5
1-3-11-6-5
1-3-11-12-13-6-5
1-3-2-9-8-10-12-11-6-5
1-7-3-4-5
1-2-3-11-6-5
1-7-8-11-6-5
1-7-3-2-9-12-13-6-5
8-10-12-13
8-7-1-3-4-5-6-13
8-7-3-4-6-13
8-7-11-13
8-9-12-13
8-9-11-13
8-11-13
8-10-9-11-13
8-7-3-11-13
8-7-1-3-2

Изначальные решения представлены ниже (О и Р – основной и резервный путь, соответственно):

О=1-3-11-8-9-10-12-13-6-5
Р=1-3-4-5
О=8-7-1-3-4-5-6-13
Р=8-7-3-4-6-13
О=1-3-2-9-8-10-12-11-6-5
Р=1-3-4-5
О=8-9-12-13
Р=8-11-13
О=1-3-11-12-13-6-5
Р=1-7-3-2-9-8-10-12-13-11-6-5
О=8-11-13
Р=8-7-3-11-13
О=1-3-2-9-8-10-12-11-6-5
Р=1-2-3-11-6-5
О=8-7-1-3-4-5-6-13
Р=8-7-1-3-2-9-10-12-13
О=1-7-8-11-6-5
Р=1-7-8-11-6-5
О=8-11-13
Р=8-9-12-13
О=1-7-3-2-9-12-13-6-5
Р=1-3-2-9-8-10-12-11-6-5
О=8-10-12-13
Р=8-11-13

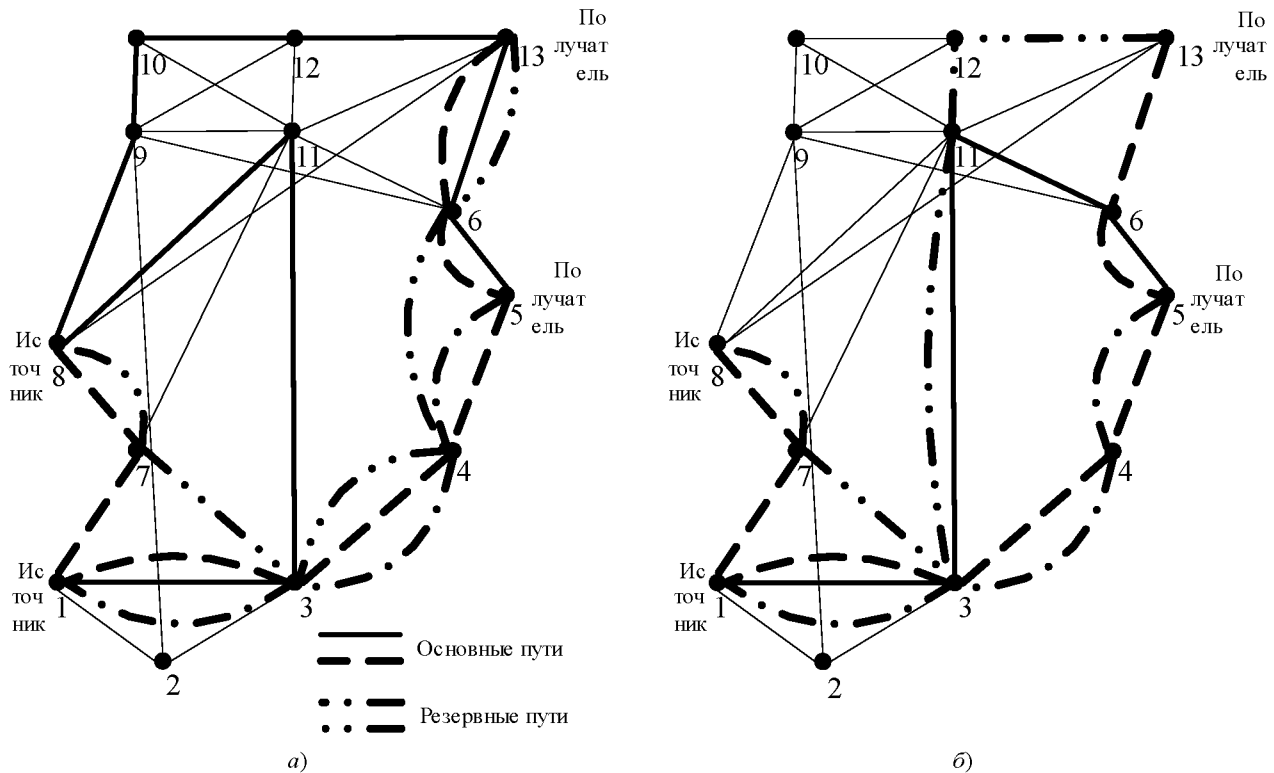


Рис. 1. Модель ТКС

Для реализации первого подхода к усовершенствованию решения рассмотрим следующие пути (рис. 1, а):

O=1-3-11-8-9-10-12-13-6-5

P=1-3-4-5

O=8-7-1-3-4-5-6-13

P=8-7-3-4-6-13

Предположим, что были выбраны первый и четвертый путь (основной путь между узлом 1 и узлом 5, резервный путь между узлом 8 и узлом 13). Затем происходит выбор номера между единицей и длиной основного пути (равной 10) минус один. Допустим, это номер 2. Это означает, что, начиная с узла 3, путь будет перестроен.

Новый путь может быть, к примеру, следующим:

O=1-3-11-6-5

Тогда, новые проектные решения будут такими (рис. 1, б):

O=1-3-11-6-5

P=1-3-4-5

O=8-7-1-3-4-5-6-13

P=8-7-3-11-12-13

Для реализации третьего подхода предположим, что 3 и 4 решения следует объединить, исходя из описанной выше методики. Также предположим, что первый резервный маршрут также будет объединен, начиная с узла 3.

P=1-7-3-2-9-8-10-12-13-11-6-5

P=1-2-3-11-6-5

После уточнения и дополнительной корректировки конечные резервные пути будут таковыми:

P=1-7-3-11-6-5

P=1-2-9-8-10-12-13-11-6-5

ВЫВОДЫ

В статье предложен многокритериальный подход к обеспечению устойчивости ТКС. Для нахождения множества основных и резервных (используемых в случае поломки основных) путей использовался принцип Парето-предпочтения, а также весовой метод, основанный на выбранных целевых функциях. В качестве показателей качества (1–3) могут быть выбраны другие критерии, в зависимости от предпочтения проектировщика.

Предложенный метод был протестирован на модели ТКС, что показало его работоспособность при определении Парето-оптимального множества основных и резервных путей. Одним из преимуществ метода является его малая вычислительная сложность, что напрямую ведет к ускорению вычисления оптимальных путей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chekuri, C.* Building edge-failure resilient networks / C. Chekuri, A. Gupta, A. Kumar [и др.] // Proceedings of the 9th integer programming and combinatorial optimization conference. – 2002. – P. 439–456.
2. *He, L.* Hybrid genetic algorithms for telecommunications network back-up routing / L. He, N. Mort // VT Technology Journal. – 2007. – 18(4). – P. 42–50.
3. *Balakrishnan, A.* Spare-capacity assignment for line restoration using a single facility type / A. Balakrishnan, T. Magnanti, J. Sokol [и др.] // Operations Research. – 2002. – 50(4). – P. 617–635.
4. *Dahl, G.* A cutting plane algorithm for multicommodity survivable network design problems / G. Dahl, M. Stoer // INFORMS Journal on Computing. – 1998. – 10. – P. 1–11.

5. Безрук, В. М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку / В. М. Безрук. – Харків : ХНУРЕ, 2002. – 164 с.
6. Bezruk, V. Multicriteria optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling / V. Bezruk, A. Bukhanko, D. Chebotaryova [и др.] // *Telecommunications Networks – Current Status and Future Trends*. – 2012. – P. 251–274.

Стаття надійшла до редакції 01.10.2012.
Після доробки 05.10.2012.

Буханько О. М.

ПРОЕКТУВАННЯ СТІЙКИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

У статті розглядаються питання проектування стійких до зовнішніх впливів телекомунікаційних мереж на основі методу багатокритеріальної оптимізації по Парето. Розроблений метод дозволяє знаходити оптимальні основні й резервні шляхи в мережі з урахуванням сукупності показників якості.

Ключові слова: оптимізація, багатокритеріальність, Парето-множина, стійка мережа, основний шлях, удосконалення рішень.

Bukhanko A. N.

DESIGNING OF THE RESILIENT TELECOMMUNICATION NETWORKS USING MULTICRITERION OPTIMIZATION

In given article the questions of designing of telecommunication networks, resistant to external influences on the basis of the multicriteria optimization Pareto method are considered.

Multicriterion optimization issues and methods based on Pareto conclusions are introduced for the long-term practical planning and designing within different types of telecommunication networks. In the present work some generalizations are made and all stages of solving multicriteria problems are analyzed with reference to telecommunication networks including the statement of a problem and finding the Pareto-optimal solutions. The developed method allows us to find the best main and redundant paths in the network taken into account the set of quality indicators.

Key words: optimization, multicriterion, Pareto set, stable network, the main path, improvement solutions.

REFERENCES

1. Chekuri C., Gupta A., Kumar A. Building edge-failure resilient networks. *Proceedings of the 9th integer programming and combinatorial optimization conference*, 2002, pp. 439–456.
2. He L., Mort N. Hybrid genetic algorithms for telecommunications network back-up routing. *BT Technology Journal*, 2007, 18(4), pp. 42–50.
3. Balakrishnan A., Magnanti T., Sokol J. Spare-capacity assignment for line restoration using a single-facility type. *Operations Research*, 2002, 50(4), pp. 617–635.
4. Dahl G., Stoer M. A cutting plane algorithm for multicommodity survivable network design problems. *INFORMS Journal on Computing*, 1998, 10, pp. 1–11.
5. Bezruk V.M. Vektorna optimizatsiia ta statychno modelyuvannia v avtomatyzovanomu proectuvanni system zvyazku. Kharkiv, KHNURE, 2002, 164 p.
6. Bezruk V., Bukhanko A., Chebotaryova D. Multicriteria optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling. *Telecommunications Networks – Current Status and Future Trends*, 2012, pp. 251–274.