

Анализ структурной надёжности транспортной сети

М.М. Егунов, В.П. Шувалов

В данной работе приводятся результаты исследования структурной надёжности сети связи транспортного уровня. Учитывая структурную сложность подобных сетей, для проведения исследований использован метод имитационного моделирования. Для различных вариантов проекта транспортной сети представлены графики зависимости показателя структурной надёжности от различных параметров транспортной сети (избыточности, коэффициентов готовности линий связи сети, ранга путей). Анализ полученных результатов позволяет выбрать вариант построения сети, обладающей максимальным показателем структурной надёжности при минимальной избыточности сети (минимальных условных затратах) для заданных коэффициентов готовности линий связи и использовании путей не необходимого ранга.

Ключевые слова: структурная надёжность, имитационное моделирование, транспортная сеть, коэффициент готовности линий связи, ранг путей.

1. Введение

Вовлечение операторов телекоммуникационных сетей в рыночные отношения выдвигает на первый план требование повышения качества предоставляемых услуг. Этому процессу в значительной степени способствует приказ Мининформсвязи РФ от 27 сентября 2007 г. [1]. В указанном документе сформулированы технические нормы на показатели функционирования сетей связи: телефонных, телеграфных и передачи данных, а также технические нормы на показатели надёжности этих сетей. Достижение нормативных значений перечисленных выше показателей в процессе эксплуатации невозможно, если эти показатели не заложены на стадии проектирования сетей электросвязи.

Для сетей связи, являющихся сложными многофункциональными системами, которые состоят из большого числа разнородных по своим свойствам устройств, по показателям надёжности, по назначению, по дате изготовления, по сроку ввода в эксплуатацию, по условиям функционирования и т.п., можно выделить два аспекта надёжности: аппаратурный и структурный [2]. Под аппаратурным аспектом понимается проблема обеспечения надёжности аппаратуры, отдельных устройств и их элементов, образующих сеть связи. Структурный аспект надёжности отражает функционирование сети в целом в зависимости от состояния узлов и линий связи. Структурная надёжность сети связана, прежде всего, с возможностью существования путей доставки информации между корреспондирующими узлами или пунктами связи сети.

В настоящее время проблеме надёжности современных транспортных сетей уделяется значительное внимание [3–7]. Однако существенными недостатками указанных работ являются:

1. Достаточно сложные модели сетей связи.

2. Использование в качестве показателя надёжности сети коэффициента готовности сети в целом.

Эти недостатки, во-первых, ограничивают область использования предлагаемых методик для решения задач проектирования реальных транспортных сетей или коррекции структуры сетей в условиях эксплуатации с учётом их структурной надёжности. Во-вторых, в [1] указаны нормы на показатели надёжности, определяющие коэффициенты готовности конкретного вида связи по отношению к пользователям соответствующих услуг. В табл. 1 представлены технические нормы на показатели надёжности для различных видов связи.

Приведённые данные указывают на необходимость учитывать надёжность путей, используемых для связи конкретных пар узлов транспортной сети, предоставляющих телекоммуникационные услуги пользователям.

Таблица 1. Технические нормы на показатели надёжности для различных видов связи

Тип сети электросвязи	Норма коэффициента готовности (Kг)
Сеть междугородной и между-народной связи	Не менее 0.999
Сеть зонной телефонной связи	Не менее 0.9995
Сеть местной телефонной связи	Не менее 0.9999
Телеграфная сеть связи и сеть Телекс	Не менее 0.9999
Сеть передачи данных	Не менее 0.99

Современные транспортные сети строятся на базе узлов (маршрутизаторов), позволяющих для связи между собой использовать любые пути. Это свойство также не нашло отражение в приведённых выше работах.

В связи с указанным выше, в данной статье представлено решение следующих задач:

1. Разработка математической модели сети, пригодной для решения задач анализа и синтеза на стадии проектирования и эксплуатации транспортной сети.

2. Выбор показателя структурной надёжности сети, учитывающего связи узлов транспортной сети между собой в процессе её функционирования с возможностью использования любых путей для связи этих узлов.

3. Разработка алгоритма и программы расчёта показателя структурной надёжности методом имитационного моделирования.

4. Исследование структурной надёжности транспортной сети с целью определения параметров сети, оказывающих влияние на структурную надёжность сети.

2. Математическая модель сети и алгоритм расчёта показателя структурной надёжности

Для оценки структурной надёжности сети используют показатели, которые в той или иной степени характеризуют устойчивость функционирования сети к отказам её элементов – узлов или линий связи. Выбор показателя (группы показателей) структурной надёжности определяется, прежде всего, используемой математической моделью адекватной сети связи [8]. В качестве такой модели в данной работе использован вероятностный граф, вершины которого поставлены в соответствие узлам, а рёбра – линиям связи сети. Веса элементов графа представляют надёжностные показатели узлов и линий связи сети – коэффициенты готовности узлов или линий связи сети. При этом значения показателей могут быть определены на основании статистических данных или различных гипотез. В представленной

работе для исследования структурной надёжности различных вариантов построения транспортной сети коэффициенты готовности линий связи рассчитываются по формуле:

$$K_{Гij} = \exp(-L_{ij}/L_0) L_n(1/K_{ГО}), \quad (1)$$

где $K_{Гij}$ – коэффициент готовности линии связи между узлами i и j транспортной сети; L_{ij} – длина линии связи между узлами i и j ; L_0 – единичная длина линии связи (100 км); $K_{ГО}$ – коэффициент готовности линии связи единичной длины.

Коэффициенты готовности узла связи – K_y , в соответствии с техническими требованиями, составляет величину $K_y \geq 0.99999$ и существенно превышают надёжность линий связи. Поэтому в приведённых исследованиях надёжность узлов не учитывается.

Для оценки структурной надёжности сети используется математическое ожидание числа связей в сети $M^*_{ОТН}(X)$, которое рассчитывается по формуле

$$M^*_{ОТН}(X) = \frac{100M(X)}{n(n-1)}, \%, \quad (2)$$

где X – случайная величина, поставленная в соответствие числу связей в сети; n – число корреспондирующих узлов сети; $M(X)$ – математическое ожидание числа связей в сети с учётом ненадёжности узлов и линий связи.

Для определения предлагаемого показателя структурной надёжности в работе используется имитационное моделирование, алгоритм которого представлен на рис.1. Поскольку каждой числовой характеристике случайной величины X соответствует статистический аналог, математическое ожидание числа связей в сети $M^*_{ОТН}(X)$ в данном случае оценивается как среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины $X - M^*_{ОТН}(X)$.



Рис. 1. Алгоритм расчёта $M^*_{ОТН}(X)$

В соответствии с приведённым алгоритмом разработано программное обеспечение, включающее удобный пользовательский интерфейс, для решения задач анализа и синтеза структуры сети транспортного уровня с учётом структурной надёжности сети.

В качестве исходных данных для решения задачи анализа будем использовать:

а) структуры сети, представленные взвешенными графами:

- вариант 1 – радиально-узловая;
- вариант 2 – кольцевая;
- вариант 3 – сетевидная сеть с коэффициентом связности узлов не менее 3;
- вариант 4 – сетевидная сеть с коэффициентом связности узлов не менее 5;

б) число вершин $n = 10$ (местоположение узлов при исследовании различных вариантов сети не меняется);

в) вес каждого ребра графа представляет соответственно длину линии связи и коэффициент готовности, рассчитанный по формуле (1);

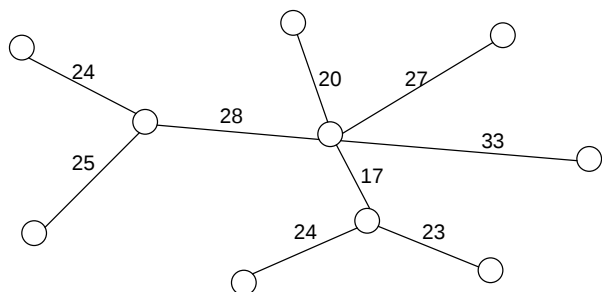
г) коэффициент готовности линии связи единичной длины $K_{ГО}$ при проведении расчётов изменяется в пределах от 0 до 0.999;

д) ранг путей (число участков сети, образующих путь), используемых для связи вершин графа, изменяется в зависимости от структуры сети от 1 до $n - 1$;

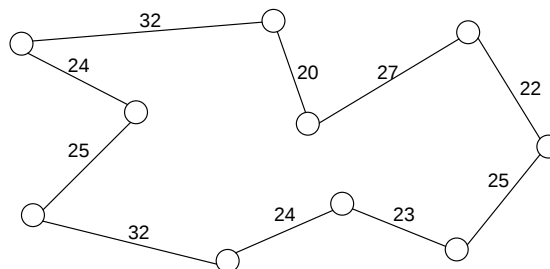
е) число проводимых испытаний для заданного значения $K_{ГО}$ определяется требованием к точности получения результатов с доверительной вероятностью 0.95 [9].

3. Анализ структурной надёжности транспортной сети различных структур

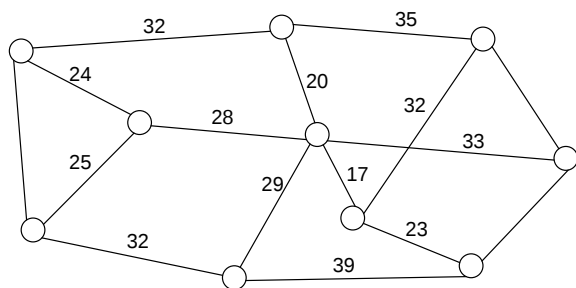
Структуры анализируемых сетей представлены на рис. 2.



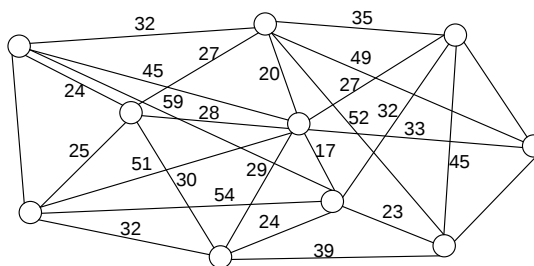
Вариант 1 – радиально-узловая структура



Вариант 2 – кольцевая структура



Вариант 3 – сетевидная структура



Вариант 4 – сетевидная структура

Рис. 2. Структуры анализируемых сетей

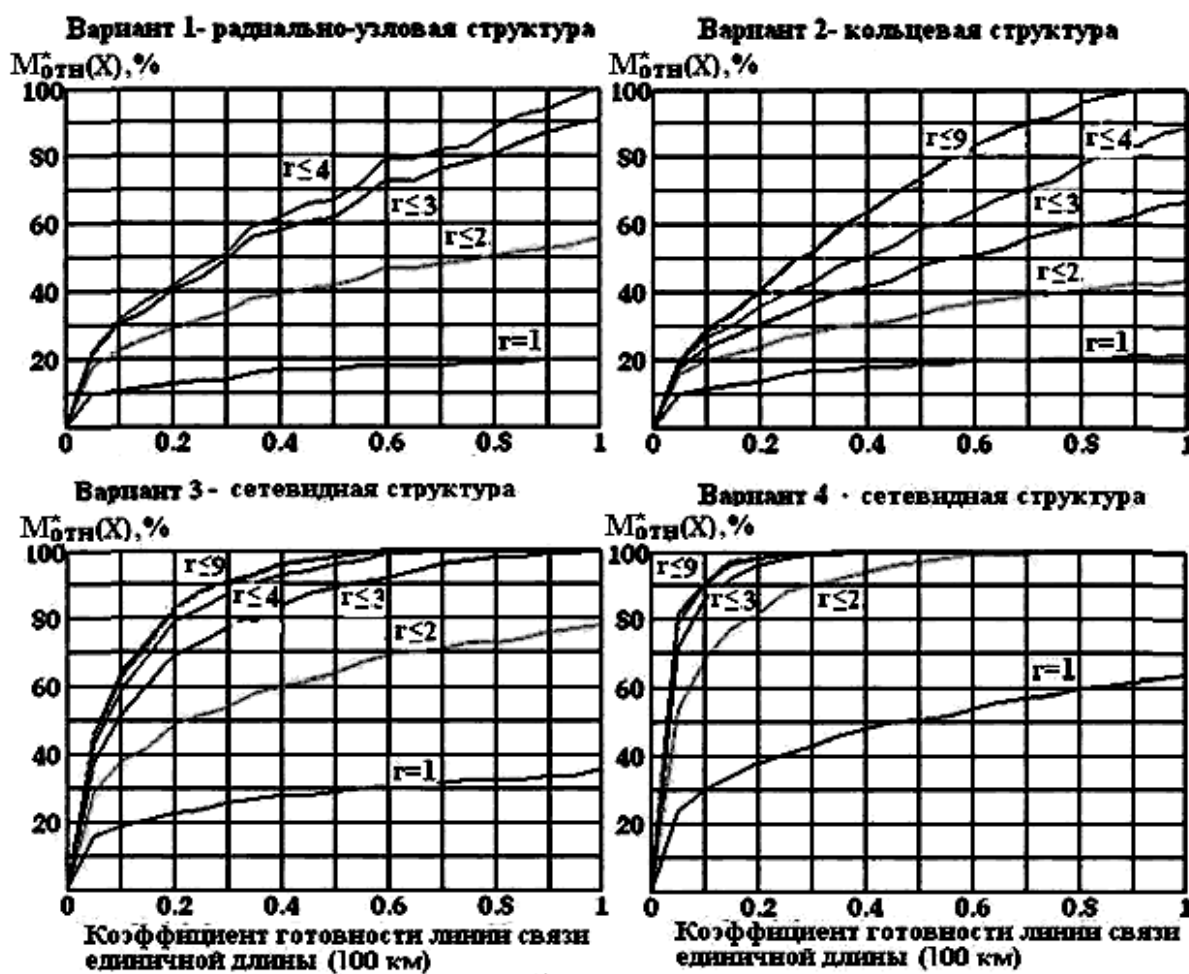
Современные транспортные сети строятся на базе ВОЛС [10]. Поэтому затраты на их построение определяются суммарной длиной различных участков сети. С учётом сказанного,

в табл. 2 представлены затраты в условных единицах различных вариантов построения транспортной сети. Затраты на коммутационное оборудование сети не учитывается, поскольку они будут одинаковыми для всех вариантов построения сети.

На рис. 3 представлены результаты расчёта $M_{отн}^*(X)$ для различных вариантов построения транспортной сети.

Таблица 2 - Условные затраты на построение транспортной сети

Вариант сети	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Суммарная длина линий связи	221 км	254 км	453 км	988 км
Условные затраты	1	1.15	2.05	4.47



r – ранг пути; $r \leq k$ указывает на использование для связи пары узлов путей от 1 до k -ого ранга включительно.

Рис. 3. Зависимости $M_{отн}^*(X)$ для различных структур транспортной сети

Полученные результаты расчётов позволяют сделать следующие выводы:

– Введение избыточного числа линий связи оказывает существенно влияние на устойчивость функционирования сети. Вариант 1 построения сети обеспечивает показатель

$M_{\text{отн}}^*(X) \geq 99\%$ при $K_{\text{ГО}} = 0.999$. Вариант 4 обеспечивает показатель $M_{\text{отн}}^*(X) \geq 99\%$ при изменении $K_{\text{ГО}}$ в пределах от 0.25 до 0.999.

Однако затраты на построение сетевидной сети (вариант 4) превышают затраты на радиально-узловую сеть (вариант 1) в 4.7 раза.

– Эффективность избыточности сети в значительной степени зависит от допустимого ранга используемых путей между узлами транспортной сети. Использование на сети только путей первого ранга приводит к значительному снижению $M_{\text{отн}}^*(X)$ во всём диапазоне изменения $K_{\text{ГО}}$ ($0 < K_{\text{ГО}} \leq 1$) даже для сети со значительной избыточностью линий связи (вариант 4). Использование путей максимально допустимого ранга позволяет повысить $M_{\text{отн}}^*(X)$ до предельного значения для заданного варианта построения сети.

– Увеличивая ранг используемых путей, можно существенно уменьшить избыточность сети, т.е. сократить затраты на её построение, обеспечивая заданные показатели структурной надёжности. Используя пути первого, второго и третьего ранга на сети варианта 3, можно обеспечить показатель $M_{\text{отн}}^*(X)$ не менее 90 % в диапазоне изменения $K_{\text{ГО}}$ от 0.53 до 0.999. При этом затраты на построение сети составят 2.05 условных единиц, что существенно меньше затрат, требуемых для реализации сети варианта 4.

– Используя приведённые зависимости, можно для каждого варианта построения сети определить минимальный ранг путей, при которых достигается предельное значение $M_{\text{отн}}^*(X)$ в диапазоне изменения $K_{\text{ГО}}$ в пределах от 0 до 1. Например, для варианта 3 целесообразно использовать пути ранга более 5, для варианта 4 – пути более 4-ого ранга.

4. Заключение

Разработанные программные средства, включающие удобный пользовательский интерфейс, позволяют решать не только задачи анализа, но и задачи синтеза, что даёт возможность достаточно эффективно производить выбор приемлемого варианта структуры транспортной сети с учётом надёжности линий связи сети, и могут быть использованы на стадии проектирования, а также коррекции структуры транспортной сети в условиях эксплуатации.

Литература

1. Приказ Мининформсвязи РФ № 113 от 27 сентября 2007 г.
2. Теория сетей связи / под ред. В.Н. Рогинского. М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.
3. Закиров В.И., Золотухин В.В. Исследование надёжности беспроводных сетей методом имитационного моделирования в среде AnyLogic // Имитационное моделирование для науки и бизнеса (ИММОД-2011), Санкт-Петербург, 2011. с.365-369.
4. Никольский И.Е. Модели и методы построения широкополосных оптических сетей доступа. Автореферат диссертации на соискание учёной степени д.т.н. ФГУП ЦНИИС-ЛОНИИС, Санкт-Петербург, 2011. – 33 с.
5. Алигулиев Э.А. Вероятность безотказной работы сети. E-journal “Reliability” Theory & Application, №1, vol. 2, 2011. – С. 88-90.
6. Бугров Д.А. Методы поэтапной структурной оптимизации магистральных корпоративных сетей. Автореферат на соискание учёной степени к.т.н. Нижегородский государственный технический университет. Нижний Новгород, 2007. – 10 с.
7. Рахматулин А.М. Разработка метода расчёта отказоустойчивости решётчатых оптических транспортных сетей. Автореферат на соискание учёной степени к.т.н. ФГУП ЦНИИС, М.: 2010. – 19 с.
8. Попков В.К. Математические модели связности. Новосибирск: РИЦ «Прайс-курьер», 2006. – 490 с.

9. Лившиц А.П., Мальц Э.А. Статистическое моделирование систем массового обслуживания. М.: Сов. радио, 1978. – 248 с.
10. Величко В.В., Субботин Е.А., Шувалов В.П., Ярославцев А.Ф. Телекоммуникационные системы и сети / под ред. В.П. Шувалова. Том 3. М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 711 с.

Статья поступила в редакцию 20.03.2012

Егунов Михаил Михайлович

к.т.н., доцент кафедры автоматической электросвязи СибГУТИ
тел. 269-82-42, E-mail: egunov_m@mail.ru

Шувалов Вячеслав Петрович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ
тел. 269 -82-40, E-mail: shvp04@mail.ru

Structural Reliability Analysis of Transport Network

M. Egunov, V.P. Shuvalov

In this paper, the results of structural transport network reliability are described. Taking into account structural complexity of similar networks, simulation technique is used to carry out research. For various design of transport network, dependence graphs of structural reliability on various parameters (excess, telecommunication lines availability, paths rank) are presented. Analysis of obtained results makes it possible to choose the way of networking having the greatest index of structural reliability with minimum network redundancy for the given availability coefficients of telecommunication lines and paths employment of necessary rank.

Keywords: structural reliability, simulation technique, transport network redundancy, readiness index, paths rank.