УДК 621.391

ВЫБОР СТРУКТУРЫ СЕТИ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

М. В. Звягинцев, старший менеджер ООО «СЦС Совинтел», cc9902@mail.ru
Д. С. Маслов, аспирант СПбГУТ
Н. А. Соколов, проф. СПбГУТ, д.т.н.

Ключевые слова: *структура сети, проектирование сети, жизненный цикл, чистая приведенная стоимость, рациональное решение.*

Радикальные изменения, происходящие в телекоммуникационной системе, стимулируют пересмотр методологических подходов к проектированию сетей. Сеть связи относится к классу сложных систем. Ряд ее важных элементов отличает длительный жизненный цикл $T_ц$ [1]. Естественно, что разработать оптимальный план развития сети на большой период невозможно. Некоторые решения приходится принимать в условиях неопределенности.

В статье обсуждаются аспекты выбора структуры сети связи. Одна из первых значительных работ в этом направлении — монография Е. В. Мархая [2]. В ней обобщены результаты исследований автора. Еще одна заметная работа, связанная с так называемой «задачей Раппа» [3], посвящена алгоритму для поиска места размещения телефонной станции. Использование этого алгоритма позволило минимизировать затраты оператора связи. Затем появились методы расчета сетей телефонной связи с несколькими коммутационными станциями (КС) [4].

Введение. Общий недостаток используемых ныне методов проектирования сети заключается в следующем:

- на каждом i-м этапе проектирования сети на период t_i (причем $t_i << T_ц$) принимались оптимальные или близкие к ним решения;
- совокупность этих решений на отрезке времени, соизмеримом с $T_ц$, не гарантирует того, что план развития сети оптимален.

По этой причине актуальна разработка методики выбора структуры сети, учитывающей заранее заданный период эксплуатации наиболее капиталоемких технических средств $T_х$, применяемых при модернизации телекоммуникационной системы. Максимальное значение периода $T_х$ равно длительности жизненного цикла наиболее капиталоемких технических средств. Вероятно, минимальным рассматриваемым значением $T_х$ будет период окупаемости $T_о$ [5]. Это означает, что справедливо неравенство: $T_о \le T_х \le T_ц$. Желательно, чтобы значение $T_х$ было как можно ближе к $T_ц$. При соблюдении этого условия ценность полученных результатов станет существенно выше, чем при $T_ц \le T_о$.

Подобный подход подразумевает использование методов, которые ранее (в явном виде) не применялись при выборе структуры сетей. Меняется и постановка задачи.

Постановка задачи. Сеть связи обычно представляют в виде графа, вершины которого $a_i (i = \overline{1, N})$ связаны между собой неориентированными ребрами [6]. Количество вершин графа N может быть известной величиной. В ряде задач эту величину надо найти в процессе выбора структуры сети. В реальных сетях N определяется в процессе их эволюции, а не является результатом решения оптимизационной задачи. Это следует из истории развития городских телефонных сетей (ГТС) мегаполисов. Например, ГТС в обеих российских столицах сначала состояли из одной телефонной станции. Очевидно, что при выборе оптимального места размещения коммутационного оборудования невозможно было предвидеть структуру будущих ГТС, число КС в которых сначала оценивалось десятками, а потом и сотнями.

Развитие телефонной сети было обусловлено двумя основными причинами: ростом численности населения и увеличением территории города. В настоящее время подобные факторы уже не столь существенны при выборе структуры ГТС. С другой стороны, на выбор структуры стали заметно влиять другие факторы, в первую очередь, связанные с процессами качественной модернизации телекоммуникационной системы. По всей видимости заметную роль будут играть процессы развития сетей доступа [7].

В настоящее время редко возникают задачи, обусловленные созданием новой сети. Проектировщику приходится учитывать все решения, которые были приняты ранее, вне зависимости от степени их оптимальности. Ряд ошибок исправить уже невозможно. С этой точки зрения эксплуатируемая сеть представляет модель, которая в технической литературе на английском языке именуется словосочетанием «as is» — как есть. На языке теории графов это означает, что координаты большинства вершин не будут меняться. Подобное утверждение в меньшей степени справедливо для ребер b_{ij}, соединяющих вершины a_i и a_j.

Для постановки задачи выбора структуры сети рассмотрим простую модель из четырех узлов. Соответствующий граф показан в левой части рис. 1. Структура сети представляет собой кольцо. Такая модель типична для современной транспортной сети. В отечественной литературе транспортную сеть часто называют первичной [4].

В правой части (рис. 1) изображена модель сети, которая будет создана через время $T_х$. При разработке модели сети используются три предположения.

1. С вероятностью, близкой к единице, в графе появляется новая вершина a_6. Если кабель между узлами a_1 и a_4 подлежит замене при модернизации сети, то ребро графа между вершинами a_1 и a_4 удаляется. Вместо него проектируется новый маршрут: a_1—a_6—a_4, состоящий из ребер

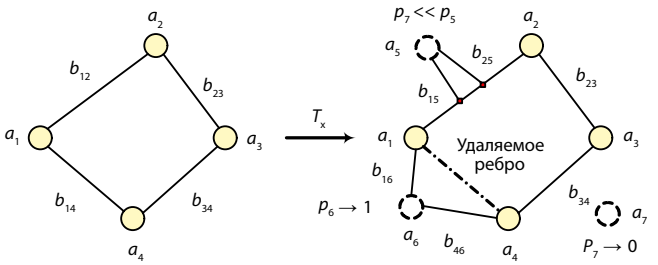

Рис. 1

b_{16} и b_{46}. Далее рассматривается именно такой случай. Если кабель между узлами a_1 и a_4 отвечает всем необходимым требованиям, то он остается в эксплуатации. Тогда ребра b_{16} и b_{46} следует рассматривать как средства включения новой вершины a_6. Модель транспортной сети в этом случае будет состоять из двух колец.

2. Вероятность появления вершины a_7—p_7 близка к нулю. Следовательно, даже если кабель между третьим и четвертым узлами сети (ребра b_{34} между вершинами a_3 и a_4) необходимо заменить, то нет смысла менять трассу. Тогда можно использовать уже имеющуюся кабельную канализацию, если ее состояние удовлетворяет требованиям на обозримую перспективу. Подобное утверждение справедливо, если достаточно только доложить новый кабель.

3. Вершина a_5 появится с вероятностью p_5, которая далека от единицы, но много больше p_7. Возможное решение — выделить два пункта (они показаны квадратиками на ребре между вершинами a_1 и a_2), через которые в какой-то момент будут созданы две трассы к вершине a_5 для формирования кольца.

Места размещения вершин a_5, a_6 и a_7 могут быть заданы не координатами точек, а некими областями S_5, S_6 и S_7. Каждая область S_i $(i=\overline{5,7})$ определяет границы территории для размещения узла сети.

При такой постановке задачи неуместно говорить о поиске оптимального решения. Целесообразно определить задачу проектирования сети как поиск *рационального варианта* ее развития на период T_x. В любом случае следует установить критерий выбора структуры сети.

Критерий выбора структуры сети. Для определения критерия *рациональности* структуры сети целесообразно ввести функцию стоимости $F(x_1, x_2,.., x_m, y_1, y_2,.., y_n)$. Предположим, что все параметры вида x_i $(i=\overline{1,m})$ относятся к ключевым переменным, т.е. существенно влияющим на поведение функции стоимости сети. Параметры вида y_i $(i=\overline{1,n})$ не входят в число ключевых переменных. Предположим далее, что задана область допустимых (с точки зрения выбора структуры сети) значений функции стоимости: $\psi_{\min}$ и $\psi_{\max}$. Пусть для каждого из ключевых параметров также определена область возможных изменений: $x_i^{\min}$ и $x_i^{\max}$. Условие существования *рационального решения* можно сформулировать в виде:

$$F(x_1^{\min}, x_2^{\min},...,x_m^{\min}, y_1, y_2,..., y_n) \geq \psi_{\min}; \quad (1)$$

$$F(x_1^{\max}, x_2^{\max},...,x_m^{\max}, y_1, y_2,..., y_n) \leq \psi_{\max}. \quad (2)$$

Для большинства функций вида $F(x_1, x_2,.., x_m, y_1, y_2,.., y_n)$ можно ограничиться одним из этих условий. Например, если с помощью исследуемой функции оценивается доход оператора связи, то уместно использовать только ограничение (1). Если функция $F(x_1, x_2,.., x_m, y_1, y_2,.., y_n)$ отражает изменение капитальных затрат, то целесообразно учитывать только ограничение (2).

В задачах проектирования сети связи обычно удается выделить один ключевой параметр — время, обозначаемое далее как t. Тогда можно оперировать функцией $F(t)$. Пусть изменения функции $F(t)$ происходят в моменты t_j. В диапазоне (t_j, t_{j+1}) значение функции $F(t)$ остается неизменным и равным A_j. Это означает, что функция $F(t)$ является ступенчатой. Ступенчатые функции полезны для исследования зависимости стоимости сети от производительности или пропускной способности оборудования.

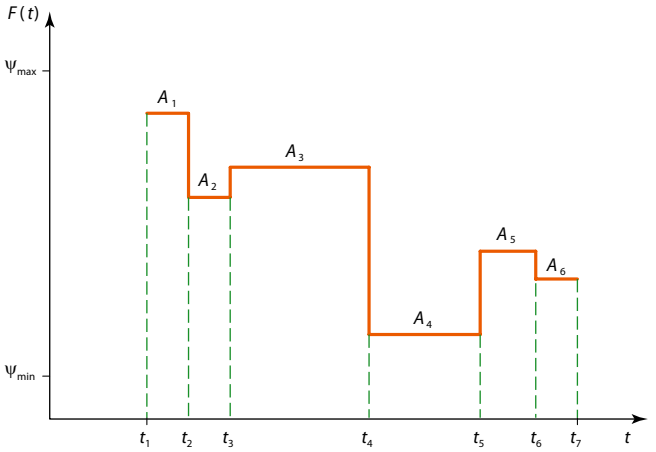

Рис. 2

Пример функции $F(t)$ приведен на рис. 2 для семи моментов времени t_j. Предположим, что функция $F(t)$ отражает изменение удельной (в расчете на один порт) стоимости КС. Тогда события, происходящие в моменты t_j, могут заключаться в расширении КС или во введении новых функциональных возможностей. В первом случае удельная стоимость КС снижается, а во втором повышается. Очевидно, что в рассматриваемом примере определение $\psi_{\min}$ не имеет практического смысла. С теоретической точки зрения корректная оценка $\psi_{\min}$ может оказаться полезной. Она позволяет обнаружить ошибки в расчетах, если функция стоимости становится ниже некого разумного предела.

Для параметра t, как одного из элементов совокупности x_i, определены границы $t^{\min}$ и $t^{\max}$. Очевидно, что $t_1 = t^{\min}$ и $t_7 = t^{\max}$. Максимальное значение функции $F(t)$ равно A_1, а минимальное — A_4. Судя по поведению функции $F(t)$, на отрезке $(t^{\min}, t^{\max})$ выполняются условия (1) и (2) существования *рационального решения*.

Ключевыми переменными x_i иногда могут быть определенные значения с вероятностями $p(x_i)$. В таких случаях $\psi_{\min}$ и $\psi_{\max}$ необходимо рассчитывать с учетом размаха распределений x_i. Это означает, что приходится рассматривать несколько сценариев развития сети. Другой подход заключается в оценке величин $\psi_{\min}$ и $\psi_{\max}$ с заранее выбранными доверительными интервалами.

Интересен также метод, основанный на модели Тьюки-Хьюбера [8]. Функция $F(t)$ представляется суммой:

$$F(t) = (1-\varepsilon)F_0(t) + \varepsilon H(t). \quad (3)$$

Функция $F_0(t)$ описывает тренд, который ожидается с вероятностью, близкой к единице. Тем не менее, с небольшой вероятностью ε будет реализован процесс $H(t)$. В качестве примеров кривых $F_0(t)$ и $H(t)$ удобно оперировать функциями распределения. Обычно $F_0(t)$ представляет собой распределение, для которого как минимум определены моменты исследуемой случайной величины. Для описания $H(t)$ иногда пользуются редко встречающимися распределениями. В частности, полезными функциями могут стать распределения с резкими изменениями плотности.

В качестве функции $F(t)$ удобно использовать кривую чистой приведенной стоимости [5]. Далее она обозначается как $NPV(z, t)$. Параметр z соответствует номеру варианта модернизации сети. Сокращение NPV образовано от словосочетания «чистая приведенная стоимость» на английском языке — Net Present Value. Для кривых NPV задается

только ограничение (1). Это означает, что цель оператора связи заключается в том, чтобы к моменту T_x величина чистой приведенной стоимости эксплуатируемой сети стала максимальна, но обязательно выше порога ψ_{min}.

Выбор для дальнейшего анализа кривых *NPV* вместо привычных критериев типа капитальных или приведенных затрат обусловлен тем, что рациональное решение следует определить для проекта, растянутого во времени. Кривые *NPV* в таких случаях широко применяются для анализа альтернативных решений. Функция *NPV(z, t)* вычисляется по формуле [4, 9]:

$$NPV(z,t)=\sum_{t=1}^{n}\frac{CF_t(z)}{(1+r)^t}-\sum_{t=0}^{n}\frac{I_t(z)}{(1+r)^t}. \qquad (4)$$

Величина $CF_t(z)$ определяет приток денежных средств в период t при реализации z-го варианта модернизации сети. Переменная $I_t(z)$ — сумма инвестиций в t-м периоде для варианта z. Ставка дисконтирования обозначена как r. Величина n равна количеству периодов, выделяемых в рассматриваемом проекте модернизации сети.

Пример разработки рационального решения. В качестве модели для предлагаемого подхода используется граф, показанный на рис. 1. Функция стоимости сети определяется как $NPV(z, t)$.

Максимальное количество новых вершин в модели равно трем. Следовательно, можно составить перечень всех вариантов изменения графа. Этот перечень приведен в таблице. Знак «+» означает, что рассматриваемый вариант основан на добавлении i-й вершины. Если используется знак «–», то i-я вершина не добавляется.

Таблица 1

Номер варианта	Обозначение новой вершины графа		
	a_6	a_5	a_7
1	+	–	–
2	+	+	–
3	+	–	+
4	+	+	+
5	–	–	–
6	–	–	+
7	–	+	–
8	–	+	+

Очевидно, что количество рассматриваемых вариантов можно уменьшить, отбросив заведомо неприемлемые решения. Их характерными примерами могут служить варианты 5—8. Можно исключить и вариант 3, учитывая заданные значения вероятностей появления новых вершин в рассматриваемом графе. В результате, достаточно исследовать только три функции: $NPV(1, t)$, $NPV(2, t)$ и $NPV(4, t)$. Будем считать, что в дополнение к таблице задана очередность строительства узлов сети, т.е. введения одноименных вершин графа.

Варианту 1, которому соответствует функция $NPV(1, t)$, присущи минимальные начальные инвестиции, но отказ от создания вершин a_5 и a_7, по всей видимости, может привести к существенному росту затрат в перспективе. Реализация варианта 4, которому соответствует функция

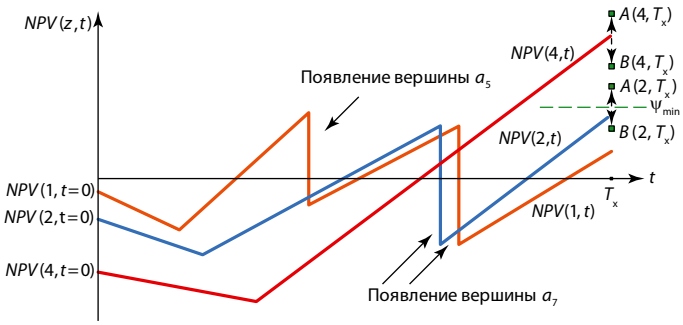

Рис. 3

$NPV(4, t)$, связана с максимальными начальными инвестициями. Этому варианту присущ минимальный объем работ, который вызван последующим введением вершин a_5 и a_7. Вариант 2, которому соответствует функция $NPV(2, t)$, можно считать компромиссом между двумя возможными решениями, представленными выше.

Предположим, что для функций $NPV(1, t)$, $NPV(2, t)$ и $NPV(4, t)$ при $t = T_x$ были найдены точки $A(z, T_x)$ и $B(z, T_x)$, определяющие доверительный интервал чистой приведенной стоимости для варианта z. Нахождение значений $A(z, T_x)$ и $B(z, T_x)$ не следует рассматривать как необходимую операцию для получения рационального решения. Тем не менее, использование этих показателей позволяет повысить качество разрабатываемого проекта.

На рис. 3 приведены типичные кривые $NPV(1, t)$, $NPV(2, t)$ и $NPV(4, t)$. Они иллюстрируют качественный характер рассматриваемых процессов. Обычно эти кривые отличаются плавным изменением. Для упрощения рисунка использованы ломаные линии. Пунктирная линия обозначает заданный уровень ψ_{min}. Расположение точек $A(z, T_x)$ и $B(z, T_x)$ показано только для вариантов 2 и 4 модернизации сети.

По очевидным соображениям предпочтение следует отдать 4 варианту модернизации сети. Правда и вариант 2, учитывая место расположения точки $A(2, T_x)$, не следует сразу же исключать из дальнейшего анализа. Возможно детальное исследование этого решения выявит его положительные преимущества. В частности, при большом значении модуля величины $NPV(4, t = 0)$ практическая значимость варианта 2 возрастает. Вариант 1 можно исключить из дальнейшего рассмотрения, поскольку он не удовлетворяет критерию, заданному для допустимых решений.

Заключение. Предлагаемый подход к выбору структуры сети представляется плодотворным с точки зрения долгосрочных перспектив развития телекоммуникационной системы. В настоящее время за длительный период времени T_x последовательно разрабатывается ряд проектов модернизации сети связи. Каждый из них охватывает некий период времени, меньший T_x. Структура сети, сложившаяся к началу работ над новым проектом, рассматривается как данность (упомянутый выше принцип «as is»). Не исключено, что каждый проект содержит оптимальное решение в части структуры сети. С другой стороны, такой подход не гарантирует, что за период T_x сеть модернизировалась оптимально. Именно это обстоятельство служит стимулом к поиску рационального решения.

В качестве важных направлений дальнейших исследований можно назвать использование функций чувствительности стоимости инвестиционного проекта и теории нечетких множеств для учета возникающих рисков [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федюкин В.К.** Управление качеством процессов.— СПб.: Питер, 2004.
2. **Мархай Е.В.** Основы технико-экономического проектирования городских телефонных сетей.— М.: Гос. изд-во литературы по вопросам связи и радио, 1953.
3. **Бесслер Р., Дойч А.** Проектирование сетей связи.— М.: Радио и связь, 1988.
4. **Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я.** Сети электросвязи.— М.: Связь, 1977.
5. **Лифиц И.М.** Теория и практика оценки конкурентоспособности товаров и услуг.— М.: «Юрайт», 2001.
6. **Харари Ф.** Теория графов.— М.: Эдиториал УРСС, 2003.
7. **Соколов Н.А.** Семь аспектов развития сетей доступа//Технологии и средства связи. Специальный вып. «Системы абонентского доступа», 2005.
8. **Орлов А.И.** Эконометрика.— М.: Издательство «Экзамен», 2002.
9. **Котов В.И.** Анализ рисков инвестиционных проектов на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств.— СПб.: Судостроение, 2007.

Получено после доработки 31.03.10

Рецензия

ТЕОРИЯ ТЕЛЕТРАФИКА — МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ

Г.П. Башарин
Лекции по математической теории телетрафика: Учеб. пособие. Изд. 3-е, испр. и доп.— М.: РУДН, 2009.— 342 с., ил.

В книге изложены фундаментальные основы современной теории телетрафика. Конечной целью исследований в этой области является определение функциональных зависимостей между объемами возникающего трафика, показателями качества обслуживания пользователей и структурными параметрами сети. Обоснованность полученных решений во многом определяется математическими моделями, методами и алгоритмами, с помощью которых они получены. Известные в литературе результаты носят разрозненный характер и нуждаются в научном осмыслении и систематизации. Решение этих проблем и стало основной целью монографии.

В главе 1 исследуются классические моносервисные модели Эрланга и Энгсета, много лет служившие основой при решении задач проектирования телефонных сетей общего пользования. Автор вводит с их помощью ряд фундаментальных понятий теории телетрафика, которые далее применяются при рассмотрении более сложных сетевых конструкций.

Главы 2 и 3 посвящены мультисервисным аналогам моделей Эрланга и Энгсета, которые могут быть использованы для оценки показателей обслуживания заявок. Показано, что, несмотря на общий характер модели, основные их характеристики находятся из простых рекуррентных соотношений.

Глава 4 посвящена классическим моделям сетей массового обслуживания, обладающим свойством мультипликативного представления вектора неизвестных вероятностей стационарных состояний. Это свойство позволяет разработать на его основе ряд рекуррентных алгоритмов оценки показателей работы сети.

Методология исследования моделей теории телетрафика, построенная автором на примере базовых моделей, может быть с успехом перенесена и на более сложные сетевые конструкции.

В главах 5—7 получены точные и приближенные соотношения для оценки показателей обслуживания заявок для моделей: мультисервисных систем с возможностями по управлению доступом; сетей сотовой подвижной связи с разнообразными предположениями о характере сот и типов каналов; оптической сети с маршрутизацией по длине волны.

Приложения к книге содержат справочный математический материал, поясняющий использование отдельных положений теории вероятностей и случайных процессов.

Необходимо отметить, что автор монографии профессор Г.П. Башарин является одним из основоположников современной теории телетрафика. Его работы хорошо известны как в России, так и за рубежом. Успехи в расчете моделей сложных систем связи во многом зависят от использования матричных методов решения систем уравнений равновесия, исследованию и практическому применению которых Г.П. Башарин в свое время уделил много внимания.

В главах 5—7 показано, как применение матричных методов позволяет значительно расширить класс моделей, используемых при описании и расчете сложных систем связи.

Несмотря на существенные продвижения в ИКТ, оценка показателей доступа пользователей к ресурсу передачи информации и времени получения запрашиваемого сервиса может осуществляться в рамках известных в теории телетрафика классов однопотоковых и многопотоковых моделей. Необходимо только выполнить интерпретацию, адекватную используемым в модели входным параметрам и характеристикам качества обслуживания.

Соответствующая методология с многочисленными примерами конкретных моделей и алгоритмов их расчета и была представлена в монографии. В этой связи можно считать, что книга будет полезна специалистам, занимающимся исследованием, разработкой и эксплуатацией современных систем телекоммуникаций, а также старшекурсникам и аспирантам соответствующих специальностей.

С.Н. Степанов,
д.т.н., профессор

От редакции. *Приобрести монографию можно в киоске издательства РУДН по адресу:*

Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, а также обратившись по тел. +7 (495) 955-0878 и (495) 955-095 (мелкооптовая покупка) или по адресу: basharin@sci.pfu.edu.ru.