М.В. Звягинцев, аспирант МТУСИ,
Д.С. Маслов, аспирант СПбГУТ,
Н.А. Соколов, д.т.н., проф. СПбГУТ

Выбор структуры сети связи с учетом жизненного цикла ее элементов

Введение

Радикальные изменения, которые происходят в телекоммуникационной системе, стимулируют пересмотр ряда методологических подходов к проектированию сетей. Сеть связи относится к классу сложных систем. Ряд ее важных элементов отличает длительный жизненный цикл [1] – $T_Ц$. Естественно, что на длительный период времени невозможно разработать оптимальный план развития сети. Ряд решений приходится принимать в условиях неопределенности.

В этой 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 связана с так называемой "задачей Раппа" [3], посвященной алгоритму для поиска места размещения телефонной станции, который минимизировал затраты Оператора связи. Затем появились методы расчета сетей телефонной связи с несколькими коммутационными станциями [4].

Общий недостаток используемых ныне методов проектирования сети заключается в следующем:

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

По этой причине актуальна разработка такой методики выбора структуры сети, которая учитывает заранее заданный период эксплуатации наиболее капиталоемких технических средств – T_X, применяемых при модернизации телекоммуникационной системы. Максимальное значение периода T_X равно длительности жизненного цикла наиболее капиталоемких технических средств. Вероятно, минимальным рассматриваемым значением T_X будет период окупаемости – T_O [5]. Это означает, что справедливо такое неравенство: $T_O \le T_X \le T_Ц$. Желательно, чтобы величина T_X была как можно ближе к значению $T_Ц$. При соблюдении этого условия ценность полученных результатов будет существенно выше, чем в случае, когда $T_X \approx T_O$.

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 связи величина 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 не было возможности предвидеть структуру будущих ГТС, количество коммутационных станций 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 сети стали заметно влиять другие факторы, которые, в первую очередь, связаны с процессами качественной модернизации телекоммуникационной системы. По всей видимости, заметную роль будут играть процессы развития сетей доступа [7].

В настоящее время редко возникают задачи, которые связаны с 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, будет справедливым для ребер b_{ij}, которые соединяют вершины a_i и a_j.

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

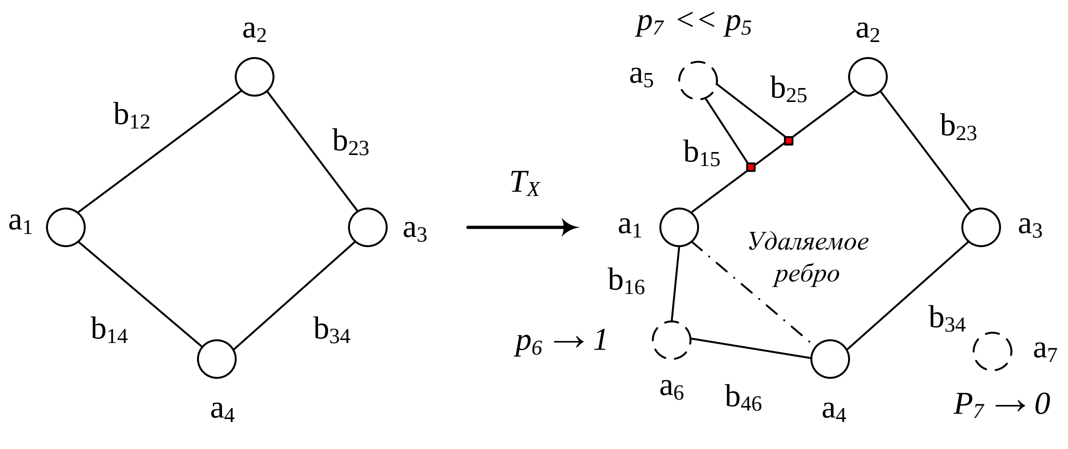

Рис. 1 – Модели структуры эксплуатируемой и планируемой сети

В правой части изображена модель сети, которая будет создана через время T_X. При разработке модели сети к моменту времени T_X используются три предположения:

1. С вероятностью, близкой к единице, в графе появится 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 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 времени 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 не уместно говорить о поиске оптимального решения. Целесообразно определить задачу проектирования сети как поиск *рационального варианта* ее развития на период времени 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, то есть существенно влияющим на поведение функции стоимости сети. Параметры вида y_i ($i = \overline{1, n}$) не относятся ключевым переменным. Предположим далее, что задана область допустимых – с точки зрения выбора структуры сети – значений функции стоимости: ψ_{min} и ψ_{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 следующем 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 при помощи 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, обозначаемый далее как t. Тогда можно оперировать функцией $F(t)$. Пусть изменения функции $F(t)$, происходят в моменты времени t_j. В диапазоне (t_j, t_{j+1}) значение функции $F(t)$ остается неизменным, 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.

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

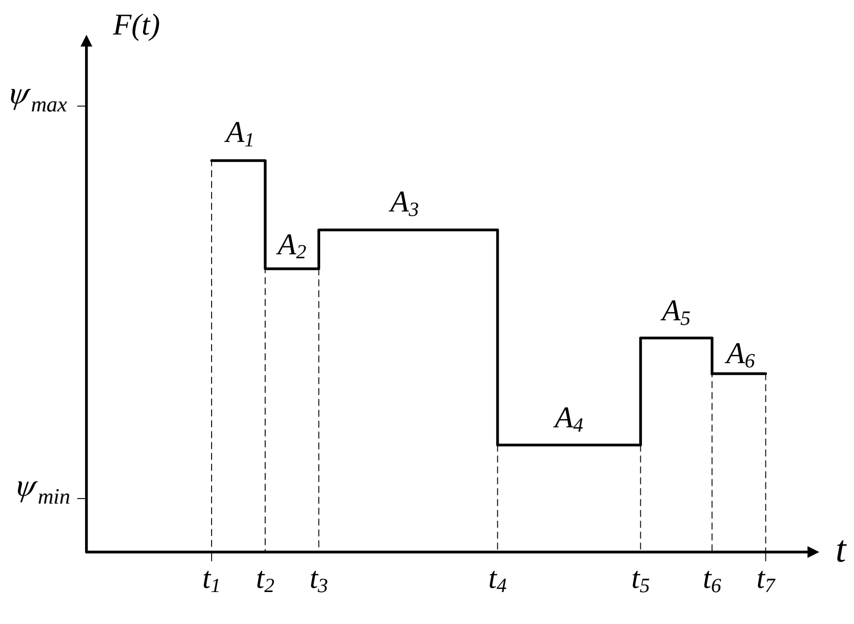

Рис. 2 – Пример функции $F(t)$

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 величины ψ_{min} и ψ_{max} необходимо рассчитывать с учетом размаха распределений x_i. Это означает, что приходится рассматривать несколько сценариев развития сети. Другой подход заключается в оценке величин ψ_{min} и ψ_{max} с заранее выбранными доверительными интервалами.

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

$$F(t) = (1-\varepsilon)F_0(t) + \varepsilon H(t). \tag{3}$$

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 используются редко встречающиеся распределения. 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" в литературе 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 времени T_X величина чистой приведенной стоимости эксплуатируемой сети стала максимальна, но обязательно была 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. Использование кривых NPV в таких случаях широко применяется для анализа альтернативных решений. Функция $NPV(z,t)$ вычисляется по такой формуле [4, 9]:

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

Величина $CF_t(z)$ определяет приток денежных средств в период времени t при реализации $z-го$ варианта модернизации сети. Переменная $I_t(z)$ – сумма инвестиций в $t-ом$

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, при помощи которой иллюстрируется предлагаемый подход, используется граф, показанный на первом рисунке. 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 первой таблице. Знак "+" означает, что рассматриваемый вариант основан на добавлении $i-й$ вершины. Если используется знак "–", то $i-я$ вершина не добавляется.

Таблица 1 – Перечень вариантов изменения графа

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, если отбросить заведомо неприемлемые решения. Их характерными примерами могут служить варианты с пятого по восьмой. Можно исключить и третий вариант, 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, то есть 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 – ему соответствует функция $NPV(4,t)$ – связана с максимальными начальными инвестициями. Этому варианту присущ минимальный объем работ, который связан с 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 определены точки $A(z,T_X)$ и $B(z,T_X)$. Эти точки определяют 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 третьем рисунке 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 выбранного примера – чтобы упростить рисунок – использованы ломаные линии. Пунктирная линия обозначает заданный уровень ψ_{min}. Расположение точек $A(z,T_X)$ и $B(z,T_X)$ показано только для второго и четвертого вариантов модернизации сети.

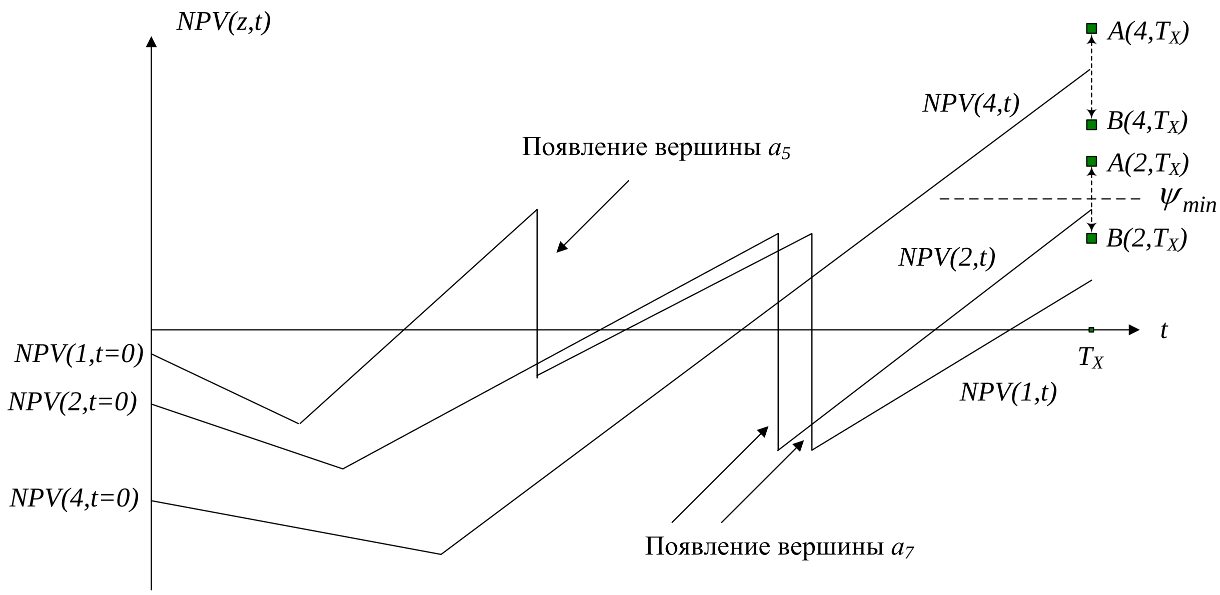

Рис. 3 – Типичные кривые чистой приведенной стоимости

По очевидным соображениям предпочтение следует отдать четвертому варианту модернизации сети. Правда, и второй вариант, 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 второго варианта возрастает. Первый вариант можно исключить из дальнейшего рассмотрения. Очевидно, что 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 проект охватывает некий период времени, который меньше T_X . Структура сети, сложившаяся к началу работ над каждым 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 времени T_X сеть связи модернизировалась оптимально. Именно это обстоятельство служит стимулом к поиску решения, которое названо рациональным.

В статье изложены общие соображения о целесообразности поиска решения, которое можно считать рациональным для задач проектирования сетей связи. 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.: Государственное издательство 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 выпуск "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.