

## О НЕСТАЦИОНАРНОСТЯХ В СВЯЗНЫХ СТРУКТУРАХ

В. К. Попков, Д. С. Легкий\*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

\*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
630102, Новосибирск, Россия

---

УДК 519.17; 004

Предложен подход, позволяющий описать и по возможности оптимизировать процесс динамического изменения телекоммуникационной сети от существующего состояния при введении нескольких факторов нестационарности, параметры которых требуют принципиального изменения характеристик исследуемой сети с учетом пространственного и временного аспектов. Описаны правила построения симуляции гиперсети. Представлены графические результаты моделирования.

**Ключевые слова:** нестационарная сеть, гиперсеть.

The approach allows to describe and to optimize the process of dynamic change of the telecommunications network from the existing state of the introduction of several factors of non-stationarity, Parameters of non-stationarity require a fundamental change in the characteristics of the studied network, taking into account the spatial and temporal aspects. Described the rules for constructing hypernet simulating the structure under consideration. Graphic simulation results are presented.

**Key words:** non-stationary network, hyper-net.

**Введение.** На сегодняшний день процесс развития телекоммуникационных сетей идет всевозрастающими темпами, при этом глобально изменилась общая ситуация в сфере инфокоммуникаций в связи с происходящим переходом от индустриального общества к информационному. Также изменились и базовые подходы к созданию и развитию телекоммуникационных сетей. Основными причинами протекающего процесса являются новые технологии, которые начинают динамично замещать существующие, и растущая конкуренция на рынке инфокоммуникационных услуг. Быстрый рост телекоммуникационных сетей происходит не только из-за возрастающих потребностей в предоставлении постоянно увеличивающегося количества разнообразных услуг, предоставляемых провайдерами, но и благодаря невиданным ранее темпам смены сетевых технологий. В настоящее время смена технологий происходит значительно быстрее, чем раз в несколько десятилетий, как это было в прошлом веке. Зачастую вводимые в существующие сети технологии оказывают значительное воздействие на саму структуру модернизируемой сети. При этом происходят не только количественный рост емкости и пропускной способности сетей, но и качественные изменения, в большинстве случаев требующие пересмотра основных принципов построения и проектирования. Наглядные примеры: переход от аналоговой техники к цифровой, введение беспроводного доступа на стационарных сетях, переход от электрических сигналов к оптическим и введение на телекоммуникационных сетях оптических

систем передачи и коммутации. В связи с этим общие подходы к планированию и проектированию телекоммуникационных сетей требуют в некоторых аспектах кардинальных изменений. Тщательная проработка принимаемых решений при долгосрочном планировании выходит на первый план, потому что ошибки планирования сетей ведут не только к существенным финансовым потерям, но и к трудноустраняемым последствиям. Все это доказывает важность исследования процессов эволюции телекоммуникаций, связанных не только с удовлетворением спроса населения и предприятий на инфокоммуникационные услуги, но и с внедрением принципиально новых технологий, существенно влияющих как на структуру модернизируемых сетей, так и на необходимые для подобной модернизации инвестиции. Особенно важной становится проблема целесообразного использования выделенных для этой цели инвестиций с учетом изменения реальной стоимости вложенных средств с течением времени. Указанная проблема требует применения нового подхода, который бы позволял имитировать нестационарные процессы в телекоммуникационных сетях.

**Постановка задачи.** Известно, что именно переходные процессы представляют наибольший научный и практический интерес вне зависимости от того, где именно они происходят: в такой большой системе как телекоммуникационная сеть или просто в электрической цепи. И в этой связи важно правильно планировать модернизации, а именно период изменений параметров сети, чтобы не ухудшить качество работы сети и наиболее рационально израсходовать выделенные для этого средства. Следовательно, необходимо оптимизировать процесс изменений в сети таким образом, чтобы учесть всю совокупность качественных, экономических и временных показателей. При этом изменения сети начинаются от некоторого исходного состояния, что значительно усложняет задачу, так как создание чего-либо заново гораздо легче, чем внесение исправлений в существующую структуру, не прерывая и не ухудшая ее работы.

Таким образом, появляется несколько важных аспектов касательно модернизации сети:

1. Требуется особое внимание пространственно-временной аспект модернизации.
2. Характеристики нового оборудования, устанавливаемого в существующую сеть, также являются важным аспектом в связи с тем, что, как правило, требуют пересмотра существующих принципов построения сети.

То есть понятие „принципиально новое оборудование“ предполагает использование технологий, применение которых требует нового подхода к планированию и проектированию сетей. При этом для реализации постепенного перехода от существующих технологий к новым на сети должно быть обеспечено сосуществование как старого, так и нового оборудования, что может быть реализовано методом наложения либо замены на отдельных узлах исследуемой сети (в качестве примера можно рассматривать переход с аналогового оборудования на цифровое). Таким образом, необходимо проанализировать модель развития сети, использующей два вида оборудования, которые можно обозначить как существующее и „перспективное“ или новое. Учитывая консервативность телекоммуникационной сети и необходимость ее непрерывной работы, очевидно, что процесс перехода от существующего оборудования к принципиально новому будет скорее эволюционным, чем революционным и может растянуться на несколько лет. Длительность переходного периода зависит от многих факторов. В частности, от состояния существующей сети, объемов инвестиций, сроков окупаемости существующего и вводимого оборудования, степени амортизации существующего оборудования, необходимой скорости роста существующей сети, определяемой в первую очередь требованиями пользователей на обслуживание сетью, а

также доступности вновь вводимого оборудования, коэффициента инфляции и многого другого. Распространенным подходом для решения задач оптимизации телекоммуникационной сети является независимое рассмотрение отдельных узлов сети с учетом фактора времени [1]. Применение такого подхода не позволяет в общем случае исследовать процесс развития сети, поскольку не учитываются пространственные связи. Другим подходом является рассмотрение сети в определенный момент времени, учитывая лишь пространственные связи и не принимая в расчет временных факторов. В связи с разработкой многоуровневой модели сети можно утверждать, что средства анализа стационарных сетей в целом созданы.

Исследования же нестационарности сетей находятся на начальном этапе, так как традиционно используемый для исследования математический аппарат (теория массового обслуживания, теория надежности), да и нетрадиционный аппарат (теория конечных цепей Маркова, теория конечных полумарковских процессов и др.) является по своей природе средством описания стационарных систем. Реальные же сети между тем являются нестационарными объектами. Их нестационарность проявляется начиная с сезонных и суточных изменений нагрузки, перемещений пользователей сети, выхода из строя и восстановления сетевых элементов и заканчивая реконfigurацией сети и многим другим. Отсутствие адекватного аппарата исследования нестационарных сетей приводит к тому, что сети рассчитываются на максимальные, пиковые нагрузки, что существенно увеличивает затраты на создание и модернизацию сети в целом.

Исходя из изложенного, задачу, рассматриваемую в работе, можно сформулировать следующим образом: разработка подхода, позволяющего описать и по возможности оптимизировать процесс динамического изменения телекоммуникационной сети от существующего состояния при введении нескольких факторов нестационарности, параметры которых требуют принципиального изменения характеристик исследуемой сети с учетом пространственного и временного аспектов.

В общей постановке очевидно, что проблема оптимального синтеза телекоммуникационной сети многокритериальная и требует некоторых правил, позволяющих сравнивать возможные альтернативы.

В простом случае такие правила могут быть заданы скалярной функцией на множестве возможных вариантов, а наилучшее решение будет определяться из условий экстремума этой функции. В практических задачах построение такой функции вызывает серьезные затруднения. Это связано с тем, что формирование целевых функций на начальных этапах выбора приводит к максимальному субъективизму и заранее определенному результату, исключая тем самым простор для поиска возможных оптимальных решений по более слабым критериям. Но с другой стороны, любой вид проектирования по своей сути многовариантен, а это требует многоаспектной, многокритериальной оценки возможных вариантов проектов с целью выбора наиболее целесообразного решения. Подробное рассмотрение экономических критериев, а именно действительной стоимости результирующей сети и действительных годовых затрат, существенно усложняет задачу, так как требует введения дисконтного коэффициента, который вносит экспоненциальную составляющую в функцию стоимости развития сети. И, как следствие этого, задача становится нелинейной.

**Решение задачи.** Наиболее известным подходом для решения комплексных проблем является разделение общей проблемы на ряд отдельных задач, последовательно решаемых в процессе исследований. Базовой ключевой задачей является введение ряда матема-

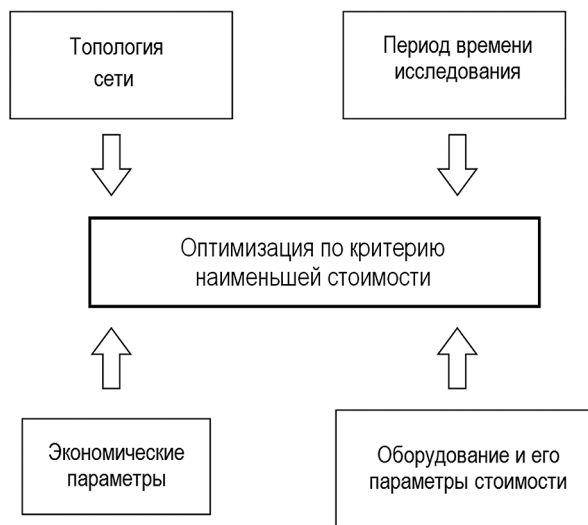


Рис. 1. Модель оптимизации телекоммуникационной сети

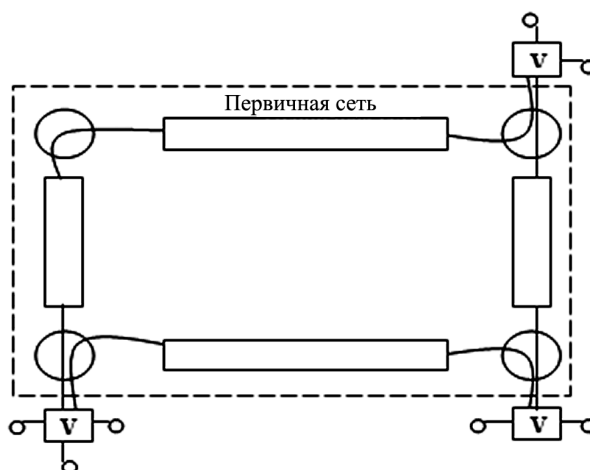


Рис. 2. Модель гиперсети

тических абстракций, позволяющих формализовать проблему. Для этого, прежде всего, выделим используемые исходные параметры и представим задачу в обобщенном виде, как показано на рис. 1.

Выделены следующие группы параметров, описывающих сеть в пространстве и времени:

- топологическая структура сети;
- исследуемый период времени;
- параметры доступного оборудования;
- экономические параметры.

Также возможно выделение других параметров сети при необходимости.

Правила построения схем моделей:

1. Линии связи первичной сети начинаются и заканчиваются в тех узлах коммутации, на первом круге которых они заканчиваются точками.

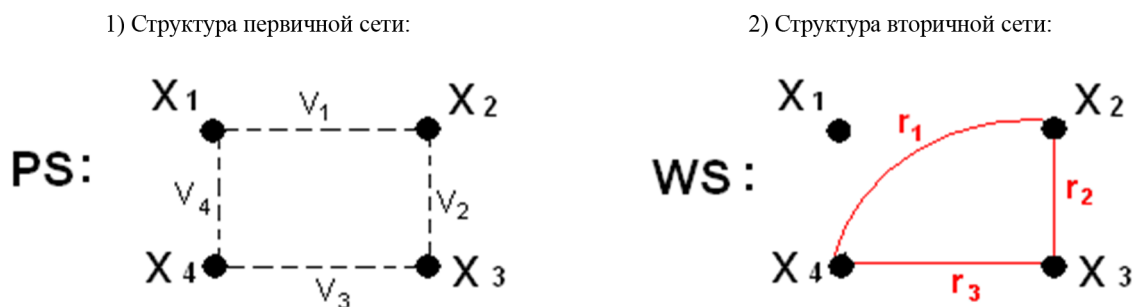


Рис. 3. Система линейных сооружений первичной и вторичной сетей

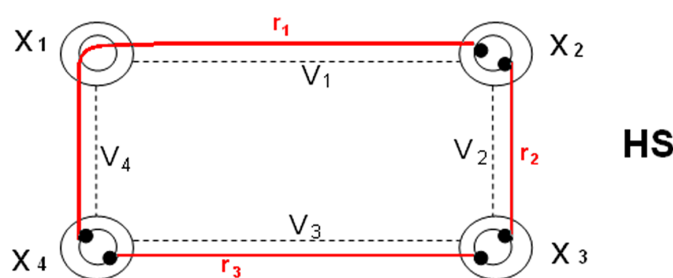


Рис. 4. Гиперсеть, объединяющая вышеперечисленные сети

2. Линии связи вторичных сетей подключаются к соответствующим узлам коммутации, которые обозначены точками на малом круге.

3. Необходимо обратить внимание, что ветви не проходят транзитом через коммутационные узлы, а заканчиваются на большем круге точкой. Ребра могут идти транзитом через узлы коммутации до следующих узлов коммутации.

4. Гиперграфы гиперсетей отображают взаимодействие ветвей и ребер, то есть являются отображением вторичных сетей в первичной. Для построения гиперграфа гиперсети необходимо каждую ветвь мысленно стянуть в точку, которую необходимо обозначить на отдельном рисунке.

5. Затем по системе линейных сооружений нужно установить, по каким ветвям проходит каждое ребро, то есть каким ветвям оно инцидентно.

6. В частном случае, если ребро инцидентно только одной ветви, то такое ребро образует петлю гиперграфа.

7. Гиперребро может быть инцидентно двум и более вершинам, тогда оно представляет участок плоскости; таким образом, ребро может быть инцидентно нулю, двум вершинам или  $n$ -ному количеству вершин, тогда оно является участком плоскости [2], [3].

Пример:

1. Представим параметр топологии сети как структуру вторичной сети WS рассматриваемой гиперсети HS.

2. Для упрощения понимания моделируемого процесса экономические параметры опишем весами ветвей первичной сети PS:  $V_1, V_2, V_3, V_4$ , вес ветвей будет отображать стоимость.

3. Оборудование и его стоимостные характеристики представим как веса вершин сети:  $X_1, X_2, X_3, X_4$ .



Рис. 5. Состояние участков вторичных сетей на оси времени

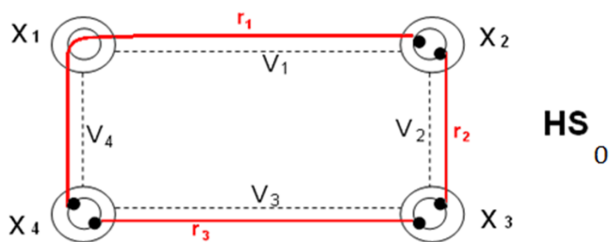


Рис. 6. Гиперсеть  $HS_0$ :  $X_1 = 3, X_2 = 5, X_3 = 4, X_4 = 2; V_1 = 1, V_2 = 4, V_3 = 2, V_4 = 6; r_1 = 4, r_2 = 1, r_3 = 2.$

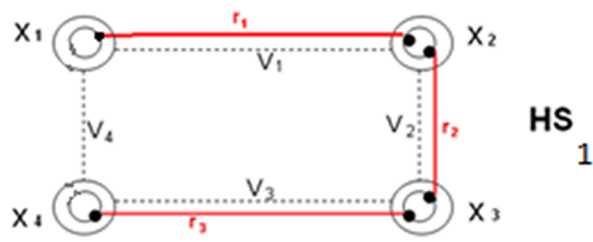


Рис. 7. Гиперсеть  $HS_1$ :  $X_1 = 4, X_2 = 7, X_3 = 3, X_4 = 3; V_1 = 2, V_2 = 3, V_3 = 4, V_4 = 6; r_1 = 3, r_2 = 1, r_3 = 2.$

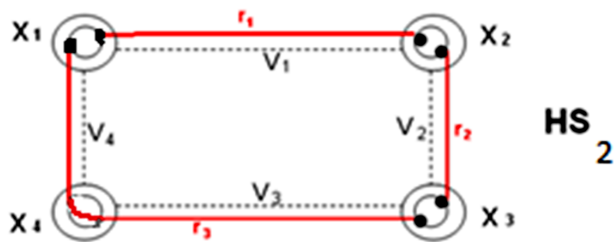


Рис. 8. Гиперсеть  $HS_2$ :  $X_1 = 4, X_2 = 6, X_3 = 4, X_4 = 4; V_1 = 2, V_2 = 3, V_3 = 4, V_4 = 5; r_1 = 3, r_2 = 1, r_3 = 4.$

4. Для отображения изменения сети во времени воспользуемся классическим отображением времени в виде оси  $t$ , отрезки цены деления которой можно выбрать произвольно, в зависимости от поставленной задачи.

На рис. 5 представлены ось времени  $t$ , а также рассматриваемые состояния сети гиперсети  $HS$ .

Зададим произвольно параметры состояний гиперсети  $HS$ . Для наглядности параметры будут задаваться графически, исключая матричные представления гиперсети (рис. 6–8).

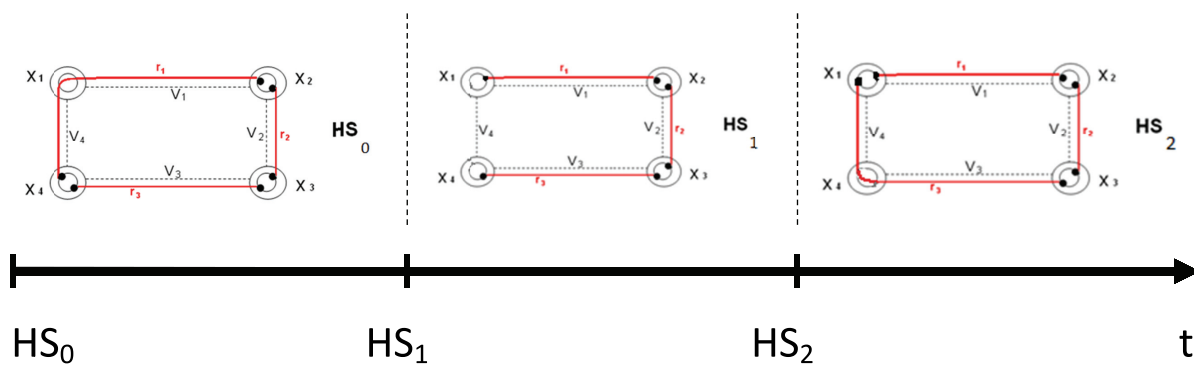


Рис. 9. Гиперсети  $HS_0, HS_1, HS_2$

Изобразим состояния гиперсети  $HS_0, HS_1, HS_2$  на оси времени  $t$  (рис. 9).

Составим матрицы по изменяемым со временем параметрам (табл. 1–3):

Таблица 1

Матричное представление изменения весов вершин во времени (рис. 10)

	$t_0$	$t_1$	$t_2$
$X_1$	3	4	4
$X_2$	5	7	6
$X_3$	4	3	4
$X_4$	2	3	4

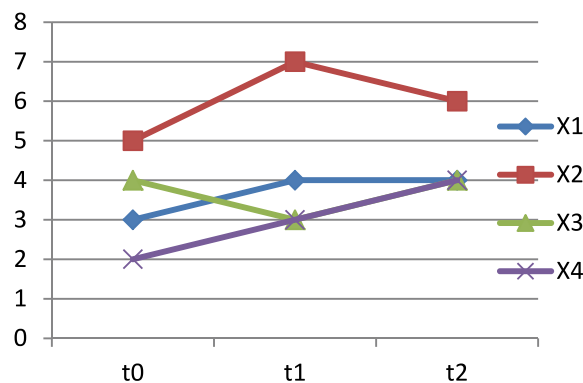


Рис. 10. Изменения весов вершин во времени

Таблица 2

Матричное представление изменения весов ветвей во времени (рис. 11)

	$t_0$	$t_1$	$t_2$
$V_1$	1	2	2
$V_2$	4	3	3
$V_3$	2	5	4
$V_4$	6	6	5

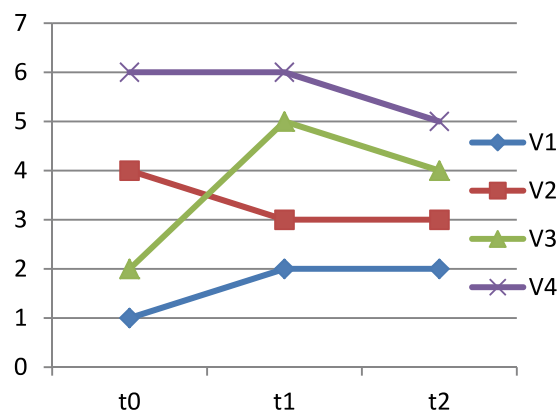


Рис. 11. Изменения весов ветвей во времени

Таблица 3

Матричное представление  
изменения весов ребер во времени (рис. 12)

	$t_0$	$t_1$	$t_2$
$r_1$	4	3	3
$r_2$	1	1	1
$r_3$	2	2	4

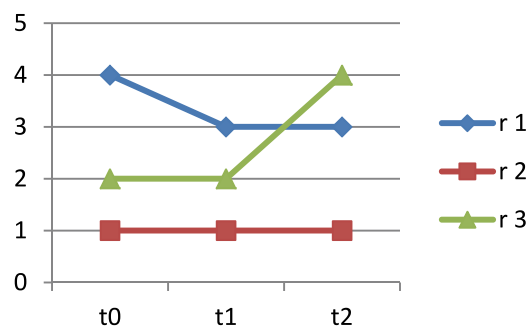


Рис. 12. Изменения весов ребер во времени

Для наглядности составим таблицу сводных данных матриц.

Таблица 4

Сводная таблица данных

	$t_0$				$t_1$				$t_2$			
$X_1 - X_4$	3	5	4	2	4	7	3	3	4	6	4	4
$V_1 - V_4$	1	4	2	6	2	3	5	6	2	3	4	5
$r_1 - r_4$	4	1	2		3	1	2		4	1	4	

Табл. 4 наглядно показывает изменения численных значений интересующих характеристик.

**Вывод.** Представленный подход позволяет описать и, используя данные результатов, по возможности оптимизировать процесс динамического изменения телекоммуникационной сети при введении нескольких факторов нестационарности.

## Список литературы

1. Попков В. К. Математические модели связности. Ч. 2. Гиперграфы и гиперсети. Новосибирск, Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2001.
2. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Изд. „Мир“, 1978.
3. Зыков А. А. Гиперграфы. Т.: Усп. Мат. Наук, 1974.
4. Попков В. К., Прохорова Н. И. Методические аспекты построения гиперграфов в области телекоммуникаций // Информатика и проблемы телекоммуникаций. Новосибирск. 2009. Т. 1. С. 117–118.

*Легкий Дмитрий Сергеевич — аспирант СибГУТИ;  
e-mail: dmitriy1990@ngs.ru*

*Попков Владимир Константинович — д-р физ.-мат. наук, проф.,  
главн. науч. сотр. Института вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН;  
e-mail: popkov@sscc.ru*

Дата поступления — 30.04.2014