

УДК 519.216

# МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕ- КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ ГРАФОВ

**Д. В. Агеев**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра телекоммуникационных систем  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166  
Контактный тел.: (057) 705-25-46  
E-mail: dm@ageyev.in.ua

*У статті запропонована в якості математичної моделі при розв'язку задач проектування сучасних телекомунікаційних систем застосовувати багатопарові графи. Наведені властивості багатопарових графів та приклад опису структури телекомунікаційної системи*

*Ключові слова: багаторівнева мережа, багатопаровий граф, телекомунікаційна система, моделювання*

*В статье предложено в качестве математической модели при решении задач проектирования современных телекоммуникационных систем использовать многослойные графы. Приведены свойства многослойного графа и пример описания структуры телекоммуникационной системы*

*Ключевые слова: многоуровневая сеть, многослойный граф, телекоммуникационная система, моделирование*

*In the given article proposed a mathematical model for solving modern telecommunication systems design problem with multi-layer graphs usage. In the article decrypted properties of multi-layer graphs and given example of telecommunication systems structural formulation*

*Keywords: multilayer network, multilayer graph, telecommunication system, modeling*

## Введение

В последнее время наблюдается бурное развитие информационных технологий, что связано с переходом от постиндустриального общества к информационному. Технической основой построения информационного общества является Глобальная информационная инфраструктура, включающей в свой состав телекоммуникационную подсистему. От телекоммуникационной подсистемы требуется обеспечение возможности передачи любого вида информации, из любой точки мира, в любое время. В настоящее время в качестве такой сети рассматриваются сети связи, построенные согласно концепции NGN. Удовлетворение выдвигаемых к телекоммуникационным системам требований возможно как за счет развития методов управления сетью, так и за счет развития методов проектирования.

Современные телекоммуникационные системы строятся по принципу наложенных сетей, когда одна транспортная сеть обеспечивает прозрачную передачу информационных потоков другой сети, образующих ее логические связи, ее логическую структуру. Таким образом, современные телекоммуникационные системы имеют многоуровневую структуру, образуемую иерархией технологий.

В данной статье предложена математическая модель структуры современных телекоммуникационных систем, которая учитывает их многоуровневую природу. Приведены свойства многослойных графов, предложена методика описания структуры современных телекоммуникационных систем с помощью многослойного графа.

## Постановка проблемы и обзор подходов к ее решению

Современные телекоммуникационные системы обеспечивают передачу различных видов трафика. Передаваемый трафик включает, но не ограничивается, передачу IP трафика Интернет, корпоративного трафика различных компаний передаваемого с использованием виртуальных частных сетей, видеотрафик и речевой трафик фиксированных и мобильных телефонных операторов. Для передачи всех этих видов трафика через сеть узлы сети должны быть оборудованы коммутационным оборудованием, обеспечивающим прием входящего трафика и его дальнейшую передачу по исходящим каналам связи. Также каналы связи между узлами сети должны иметь достаточную пропускную способность, чтобы обеспечить передачу циркулирующих в сети информационных потоков.

При строительстве данных сетей или их модернизации перед сетевым провайдером возникает задача проектирования телекоммуникационной системы. Постановка задачи проектирования в общем виде заключается в определении множества узлов сети и каналов связи между ними (топологии сети), определении пропускных способностей каналов связи и параметров устанавливаемого в узлах сети оборудования, определении маршрутов передачи информационных потоков через сеть и величины потоков передаваемых вдоль этих маршрутов.

Современные телекоммуникационные системы являются большими сложными системами, которые тяжело подаются математическому описанию. Телекоммуникационные системы строятся по иерархическому, многоуровневому принципу, как организационно, так и технологически.

Организационно телекоммуникационные системы делятся на уровни при этом, более высокие уровни управляют и обеспечивают взаимодействие более низких в иерархии уровней. Уровни организационной иерархии обычно разделены территориально. Например, магистральный сегмент сети (WAN), региональная сеть (MAN) и локальная сеть (LAN).

Уровни технологической иерархии представляют собой наложенные сети, использующие различные технологии. Каждая связь в верхнем уровне использует один или несколько путей на более низком уровне. Например, IP-канал между двумя IP-маршрутизаторами может обеспечиваться одним или несколькими световыми потоками в нижележащей волоконно-оптической сети.

Известные ранее подходы при решении задач проектирования используют для учета многоуровневой природы современных телекоммуникационных систем последовательное решение задач проектирования для каждого из уровней отдельно. При этом результаты проектирования на одном из уровней являются исходными данными для остальных уровней сети. При этом в процессе проектирования не учитываются взаимосвязи и взаимозависимости между уровнями. В результате, итоговый вариант конфигурации сети не является оптимальным, а в ряде случаев может привести к нестабильной работе проектируемой сети при эксплуатации.

Для решения данной проблемы рядом авторов [1,2] предлагается использовать математическую модель многоуровневой сети, которая построена с использованием упорядоченного набора графов. Топология каждого графа может отличаться, они могут иметь разный набор ребер, при этом, как правило, множество вершин графа с большим индексом (графа более высокого уровня) является подмножеством вершин графа с индексом на единицу меньшим (нижележащего уровня). В работе [1] с использованием математической модели многоуровневой сети автором решается задача синтеза оптимальной согласно критерию минимум стоимости структуры сети с обеспечением ее живучести за счет резервирования пути доставки сообщения на различных ее уровнях.

В указанных выше работах при построении модели местоположения оборудования узлов, обеспечивающих функционирование вышележащих уровней заранее известно. Однако на практике при решении

задач проектирования современных телекоммуникационных систем часто возникает задача нахождения местоположения коммутационного оборудования.

В работе [3], посвященной решению задач нахождения кратчайшего пути от одного пункта до другого и обратно в условиях крупного города с использованием различных видов транспорта. Предлагаемая в работе математическая модель транспортных сетей города описывается графом, в состав которого входят подграфы, описывающие топологию каждой из транспортных сетей, в узлах, в которых возможна смена вида транспорта на другой, вводятся дополнительные вершины и ребра.

В работе [4] предложен подход позволяющий решать задачи проектирования современных телекоммуникационных систем с использованием предлагаемого автором многослойного графа, приведен пример постановки задачи с использованием предлагаемой математической модели. В работе [5] проведено исследование свойств многослойных графов и предложены методы решения задач поиска многослойных подграфов минимального веса.

В данной статье предлагается объединить идеи, изложенные в указанных работах. Предлагаемая математическая модель представляет собой многослойный граф, в котором связь между уровнями обеспечивается дополнительными ребрами и вершинами. Предложена методика описания структуры современных телекоммуникационных систем многослойными графами. Рассмотрим предлагаемую модель подробнее.

### Описание математической модели

Для математического моделирования структуры систем, в том числе телекоммуникационных, широко применяются графы. При описании системы с помощью графа элементы системы моделируются вершинами графа, а связи между ними ребрами или дугами.

Для моделирования многослойных телекоммуникационных систем нами предлагается использовать многослойный граф  $MLG = (G, V, E)$ , который включает в свой состав:

- множество подграфов  $G = \{G^1, \dots, G^l, \dots, G^L\}$ ,  $G^l = (V^l, E^l)$ , где подграф  $G^l$  описывает структуру сети на уровне  $l$ .

- вершины  $v_i \in V$  и ребра  $e_k = (v_i, v_j)$ ,  $e_k \in E$  обеспечивают связь подграфов  $G^l$  между собой (рис. 1).

На структуру графа  $MLG$ , моделирующего мультисервисные телекоммуникационные системы накладывается дополнительное ограничение, которое заключается в том, что для каждого ребра  $e_k^l = (v_i^l, v_j^l)$ ,  $e_k^l \in E^l$  подграфа  $G^l$  существует путь  $\pi = (v_i^1, \dots, v_m^n, \dots, v_j^1)$  между вершинами  $v_i^1$  и  $v_j^1$ ,  $v_i^1, v_j^1 \in V^1$  проходящий через подграф более низкого уровня:

$$\forall e_k^l = (v_i^l, v_j^l), e_k^l \in E^l, v_i^l, v_j^l \in V^l, \exists \pi = (v_i^1, \dots, v_m^n, \dots, v_j^1), v_m^n \in V^n, n < l \tag{1}$$

Данное правило не выполняется только для подграфа самого нижнего уровня,  $l = 1$ .

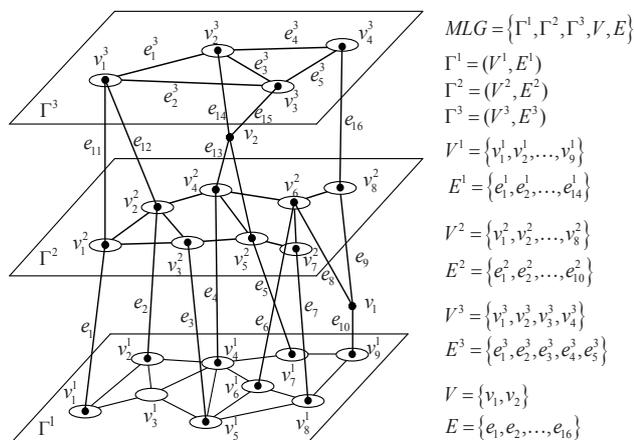


Рис. 1. Пример многослойного графа

Многослойный граф MLG обладает следующими свойствами:

C1. Если подграф  $\Gamma^l$  многослойного графа MLG связанный и  $l > 1$ , то каждая вершина  $v_i^l$  подграфа  $\Gamma^l$  имеет как минимум одно исходящее ребро принадлежащее графу  $\Gamma^{l-1} \subset \Gamma^l = (V, E)$ , связывающий слой  $l$  с нижележащими слоями.

C2. Если для MCG MLG выполняется условие (1) и для любого слоя выше слоя  $l$  существует путь, проходящий через подграф не ниже слоя  $l$ , то выполнение условия для слоев  $n \leq l, n > 1$  гарантирует выполнение условия (1) для MCG MLG в целом.

**Метод описания современных мультисервисных телекоммуникационных систем многослойными графами**

Как уже отмечалось выше современные телекоммуникационные системы имеют сложную структуру, которую невозможно описать в рамках использования математической модели применяемой в теории графов. Одним из свойств современной телекоммуникационной системы является наличие технологической иерархии, которая реализуется в виде наложенных сетей и рассмотрена ранее.

Для описания современных телекоммуникационных систем в данной работе предлагается использовать в качестве математической модели многослойный граф. Применение многослойного графа позволяет в отличие от классических графов учитывать технологическую иерархию современных телекоммуникационных систем, а именно наложенный принцип построения этих систем.

Для описания телекоммуникационной системы многослойным графом необходимо выполнить следующие операции:

O1.1. Выделить в моделируемой телекоммуникационной системе множество уровней.

O1.2. Описать топологию каждого уровня с помощью классического графа.

O1.3. Выделить между объектами различных уровней логические, функциональные и физические связи и описать их с помощью графов.

O1.4. Присвоить ребрам и вершинам графа набор параметров, характеризующих параметры соответ-

ствующих объектов и меж объектных связей, составляющих интерес для моделирования.

При выполнении операции O1.1 в моделируемой системе выделяют множество наложенных структур, который необходимо учесть при моделировании, и которые выполняют некоторую функцию и могут выступать как отдельный объект анализа.

Рассмотрим выполняемые операции на примере.

**Пример 1.**

Дана IP-сеть, работающей поверх сети Ethernet и использующей для передачи сигналов оптический кабель

Для данной сети в ее структуре можно выделить следующие уровни:

- уровень IP-сети, который представляется совокупностью IP-узлов, связанных IP-каналами;
- уровень Ethernet сети, представляемый множеством узлов сети, связанных собой каналами связи, являющимися транспортной средой для уровня IP-сети;
- уровень оптической сети, представленный узлами оптической сети связанными оптическими кабелями связи. В узлах сети оптической могут уславливаться оптические разветвители, мультиплексоры/демультиплексоры и другое оборудование оптической сети;
- уровень кабельных каналов, представляемый колодцами и кабельными каналами, используемыми для прокладки оптического кабеля.

При выполнении операции O1.2, для каждого отдельного уровня, выделенного на шаге O1.1 определяется топология сети. Для этого:

O2.1. Каждый узел сети на данном уровне заменяется вершиной графа.

O2.2. Определяются пары непосредственно взаимодействующих узлов (т.е. пары узлов, которые при своем взаимодействии не используют другие узлы данного уровня, в качестве транзитных).

O2.3. Для каждой пары непосредственно взаимодействующих узлов в состав графа вводится ребро, соединяющее соответствующие вершины графа.

Для рассматриваемого в качестве примера телекоммуникационной системы (пример 1) в результате выполнения операций O2.1 – O2.3 получим по одному связанному графу для каждого выделенного в структуре сети уровня.

Для самого верхнего слоя, соответствующего уровню IP-сети, граф будет содержать множество вершин, представляющих узлы IP-сети. Узлы сети, IP-адреса которых, имеют одинаковую часть соответствующую номеру сети, могут взаимодействовать непосредственно. Узлы сети с разными номерами сети в адресной части взаимодействуют посредством маршрутизаторов (IP-шлюзов). Из выше сказано следует, что граф, соответствующий уровню IP-сети, представляет собой множество полностью связанных подграфов (каждый полностью связанный подграф содержит вершины, соответствующие узлам с одинаковыми номерами IP-сети в адресной части). Каждый из указанных подграфов связан с другим подграфом посредством общих вершин, соответствующих узлам сети, где установлены IP-шлюзы.

Граф слоя, соответствующий уровню сети Ethernet, содержит вершины, соответствующие узлам сети Eth-

ernet. В сетях, построенных с использованием технологии Ethernet, узлы могут:

- взаимодействовать непосредственно друг с другом (в случае использования общей среды передачи)
- посредством центрального узла (в случае использования коммутируемых соединений).

В зависимости от этого различается топология графа этого слоя. Так в обоих случаях граф данного слоя содержит множество подграфов, количество которых, соответствует количеству Ethernet сегментов в моделируемой сети. При этом связь между подграфами осуществляется посредством ребра соединяющего вершины подграфов, которые соответствуют узлам сети, где установлен коммутатор или мост соединяющий сегменты Ethernet сети. Различия в топологиях графа данного слоя заключается в топологии, входящих в его состав подграфов.

Так, в первом случае каждый подграф является полностью связным.

Во втором случае каждый подграф имеет топологию «звезда».

Граф слоя уровня оптической сети содержит множество вершин, соответствующих узлам оптической сети, где установлены оптические разветвители, мультиплексоры/демультиплексоры и другое оборудование. Ребра данного графа соответствуют оптическим кабелям, соединяющим узлы сети и тем самым топология графа повторяет топологию оптической сети.

В качестве вершин графа самого нижнего слоя выступают вершины, соответствующие кабельным колодцам. Ребрами данного графа являются ребра, соответствующие кабельным каналам, используемым для прокладки оптического кабеля.

При выполнении операции О1.3 в состав многослойного графа вводятся ребра соединяющие вершины, принадлежащие разным слоям. Каждое вводимое ребро соответствует логической и физической связи между узлами наложенных сетей.

Для рассматриваемой сети (пример 1) в качестве такой связи используется связь «расположен», то есть, вводимое в состав многослойного графа ребро соединяет вершины соответствующие узлам наложенной сети, которые располагаются в одном и том же месте моделируемой мультисервисной сети.

При выполнении операции О1.4 каждому ребру многослойного графа приписывается ряд параметров, соответствующих параметрам моделируемой сети. В качестве таких параметров для рассматриваемой сети (пример 1) выступают следующие параметры.

Для графов слоев, соответствующих наложенным сетям:

- пропускные способности каналов между узлами сети;
- задержки передачи единицы сообщения в соответствующих каналах связи;
- джитер времени доставки единицы сообщения в соответствующих каналах связи;
- параметры информационных потоков, передаваемые по каналам связи;
- надежность каналов связи.

Для ребер соединяющие вершины разных слоев многослойного графа, в качестве параметров приписываемых ребрам выступают:

- производительность соответствующих узлов наложенных сетей (максимальная величина потока обслуживаемого узлом);
- надежность узлов;
- время обработки сообщения в узле.

---

## Заключение

---

Процесс проектирования современных мультисервисных телекоммуникационных систем требует использования математических моделей его функционально-структурных свойств, которые наиболее полно описывают особенности данного класса систем. В статье в результате проведенного анализа структурных и функциональных свойств телекоммуникационных систем предложено использовать для описания телекоммуникационных систем на этапе проектирования многослойные графы, которые являются частным случаем классических неплоских графов с рядом дополнительных ограничений.

Предложенный в статье многослойный граф позволяет более полно учесть технологическую и организационную иерархию мультисервисных телекоммуникационных систем. Применение предложенной математической модели позволит решать большой круг задач возникающих в процессе проектирования, такие как определение мест размещения оборудования, физическая и логическая топология сети, задача распределения потоков и др.

Предложенный в статье подход может быть применен на практике при разработке систем автоматизации проектирования сетей NGN, для описания структуры проектируемой системы.

---

## Литература

1. Orłowski, S. Two-layer network design by branch-and-cut featuring MIP-based heuristics [Текст] / S. Orłowski, A.M.C.A. Koster, C. Raack, R. Wessly // Proceedings of the 3rd International Network Optimization Conference (INOC 2007). – Spa, Belgium, 2007. – P. 80 – 92.
2. Capone, A. Multi-Layer Network Design with Multicast Traffic and Statistical Multiplexing [Текст] / A.Capone, G. Carello, R. Matera // IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM). – Washington, USA, 2007. – P. 2565 – 2570.
3. Lozano, A. Shortest viable path algorithm in multimodal networks [Текст] / A. Lozano, G. Storchi // Transportation Research. – 2001. – № 35, part A. – P. 225 – 241.
4. Агеев, Д.В. Проектирование современных телекоммуникационных систем с использованием многоуровневых графов [Текст] / Агеев Д.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4/2 (46). – С. 75 – 77.
5. Агеев, Д.В. Моделирование современных телекоммуникационных систем многослойными графами [Электронный ресурс] / Агеев Д.В. // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 23 – 34. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_ageyev\\_simulation.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ageyev_simulation.pdf).