

УДК 621.391

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ В ВИДЕ МНОГОСЛОЙНОГО ГРАФА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ СТРУКТУРИРОВАННОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ



Д.В. АГЕЕВ, ФУАД ВЕХБЕ

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – The article focuses on the fact that modern information and communication systems in its structure are layered. The basis of these systems form overlay networks. Processes at different levels, have a strong influence on each other. The same is strongly influenced by the structure of the network and one of the levels on the characteristics of the other. Therefore, when solving problems of structural and parametric synthesis for the synthesized system should be approached as a single holistic entity.

The article gives an overview of the different approaches that are used in solving planning enterprise communication systems. As a result, the review states that is the most promising approach, which is based on the use of multi-layered graphs.

This paper proposes a method of synthesis of multilayer graph for solving the structural synthesis of infocommunication enterprise system. Synthesized as a multilayer model takes into account the graph topology Ethernet, cable ducts and mutual informational connection in the infocommunication system.

Анотація – У роботі пропонується методика синтезу багатослоєвого графа для вирішення задач структурного синтезу інфокомунікаційної системи підприємства. Синтезована модель у вигляді багатослоєвого графа враховує топологію мережі Ethernet, кабельної каналізації та взаємні інформаційні зв'язки інфокомунікаційної системи

Аннотация – В работе предлагается методика синтеза многослойного графа для решения задач структурного синтеза инфокоммуникационной системы предприятия. Синтезированная модель в виде многослойного графа учитывает топологию сети Ethernet, кабельной каналізації и взаимные информационные связи инфокоммуникационной системы.

Введение

Получившие широкое распространение информационные технологии находят свое применение при решении задач организация инфокоммуникационных систем предприятия и внедрении систем электронного документооборота и автоматизации деятельности предприятий. В состав развертываемых систем как обязательный элемент входит телекоммуникационная система, от эффективности которой зависят характеристики внедряемых на предприятии информационных систем.

В настоящее время распространенной классификацией вычислительных сетей является классификация по масштабу производственного подразделения, в пределах которого действует сеть. При этом различают три класса вычислительных сетей – сеть отдела, кампусную сеть, корпоративную сеть [1]. Сеть отдела используется небольшой группой сотрудников, работающих, как правило, в одном отделе предприятия. В сети отдела обычно имеется не более 30 компьютеров пользователей, один – два сервера.

Кампусные сети объединяют множество сетей отделов одного здания или нескольких рядом стоящих зданий. Относительно небольшая площадь сетей позволяет использовать высокоскоростные сетевые технологии. Глобальные соединения (т.е. соединения, основанные на технологиях глобальных сетей, таких, как X.25, Frame Relay, ISDN) в сетях кампусов используются редко. Корпоративные сети, называемые также сетями масштаба предприятия, объединяют в единую сеть все вычислительные устройства предприятия.

Современные телекоммуникационные системы по своей структуре являются многоуровневыми. Процессы, протекающие на различных уровнях, оказывают сильное влияние друг на друга. Такое же сильное влияние оказывает и структура сети на одном из уровней на характеристики другого. Поэтому при решении задач структурного и параметрического синтеза к синтезируемой системе необходимо подходить, как к единому целостному объекту.

Учет многоуровневой структуры современных телекоммуникационных систем возможен за счет применения моделей в виде многослойного графа [2], которые позволяют адекватно описывать существующие физические и логические связи между элементами системы на различных ее уровнях и эффективно решать задачи синтеза.

Наибольшую актуальность данный подход приобретает при проектировании и анализе функционирования облачных систем, когда совокупность пространственно-распределенных взаимодействующих серверов необходимо представить единым объектом: «облаком» и в то же время учесть структуру и характеристики оборудования уровня телекоммуникационной сети; ограниченную производительность отдельных узлов и каналов сети; потоки, протекающие в сети; задержки, возникающие в системе при обслуживании запросов пользователей.

В данной работе проведена методика синтеза модели инфокоммуникационной системы предприятия, учитывающей структуру кабельной канализации и позволяющей решать задачи планирования инфокоммуникационных систем предприятия минимальной стоимости.

I. Анализ литературных источников

Решение задачи проектирования сети состоит из двух стадий: архитектурной и телекоммуникационной [3]. На архитектурной стадии определяются пути прохождения кабельных каналов, размещение технических помещений (кроссовых и аппаратных), рабочих мест пользователей сети. Эти задачи решаются при разработке проекта нового или реконструируемого здания специализированными проектными организациями. На телекоммуникационной стадии проектирования определяется структура кабельной системы, перечень и размещение коммуникационных устройств.

Кабельную систему здания, являющуюся основой кампусной сети, рекомендуется проектировать в соответствии с международными стандартами ISO/IEC 11801, TIA/EIA-568-A, задающими характеристики структурированной кабельной системы

(СКС) [3]. В качестве топологии СКС рекомендуется использовать древовидную топологию. Узлами структуры являются технические помещения (кроссовые и аппаратные), которые соединяются друг с другом электрическими и оптическими кабелями.

Решение задачи планирования данного класса систем является сложной задачей, которой посвящено множество работ. Так, в работе [4] приведена формализация задачи синтеза оптимальной структуры кампусных сетей, которая учитывает большое количество технических, технологических и экономических параметров. При этом в работе не предложен метод решения данной задачи.

В направлении развития методов решения задачи синтеза оптимальных по стоимости топологии сетей масштаба предприятия существует ряд работ. В основном эти работы посвящены применению для решения данной задачи ранее известных методов синтеза сетей доступа с древовидной топологией [5, 6]. Используемые подходы обычно базируются на декомпозиции решаемой задачи, а следовательно, решают задачу по частям, где результаты решения одной задачи являются исходными данными для следующей. Это не гарантирует получения оптимального решения задачи в целом.

При синтезе современных мультисервисных телекоммуникационных систем необходимо учитывать многоуровневую структуру, образованную наложенными сетями. Известные ранее подходы при решении задач проектирования используют последовательное решение задач проектирования для каждого из уровней отдельно [7].

Учет многоуровневой структуры телекоммуникационных систем, образуемой наложенными сетями, можно произвести за счет разделения системы на логическую и физическую сети [8]. При этом топология каждой сети описывалась графом, каждое ребро логической сети представлялось в виде потока, протекающего по физической сети. Использование данного подхода ограничивалось обычно двумя уровнями. При проектировании сетей с большим количеством уровней задача сводилась к двухуровневому случаю, ее решение осуществлялось за счет последовательного проектирования каждого уровня с использованием результатов как исходных данных для проектирования соседнего уровня, что не дает оптимального решения задачи в целом.

Дальнейшим развитием идеи разделения структуры наложенных сетей на логическую и физическую является модель многослойной сети [9, 10]. Каждая наложенная сеть, входящая в состав моделируемой сети, называется слоем. Каждый слой описывается графом, при этом множество вершин графа верхнего слоя является подмножеством вершин нижнего слоя. Для многослойной сети вводится дополнительное ограничение, что каждый канал верхнего слоя соответствует одному или нескольким путям в нижнем слое. Использование описанной модели позволяет решать задачу нахождения структуры каждого уровня телекоммуникационной сети комплексно для всей системы.

Общим недостатком модели многослойной сети является то, что она не позволяет описывать структуру многоуровневой системы, имеющей множественные связи между элементами разных уровней, а также потенциальные связи, которые необходимо учитывать при решении задач структурного синтеза.

Для устранения данного недостатка в работах [11] предложена математическая модель современных телекоммуникационных систем, содержащих наложенные сети, представленная в виде многослойного графа.

В работе [12] предложена методика описания современных телекоммуникационных систем, имеющих многоуровневую структуру, образованную наложенными сетями. Описание телекоммуникационных систем многослойными графами позволяет учитывать свойства многослойных сетей. С помощью этой модели впервые удалось отобразить логические и физические связи, имеющие место в реальных телекоммуникационных системах, что позволило учесть эти связи при проектировании систем в целом как единого целостного объекта.

II. Предметная постановка задачи

Проектируемая сеть является основой инфокоммуникационной системы предприятия, которая выполняет функции обмена данными между абонентскими хостами, а в результате обеспечивает функционирование информационно-телекоммуникационной системы с серверами предприятия. В общем виде задачу можно сформулировать следующим образом. При известном местоположении абонентов сети, потенциальных мест расположения сетевого оборудования и серверов, потенциальных и существующих каналов кабельной канализации необходимо определить структуру сети и маршруты прокладки кабелей.

Формулировка задачи.

Задано:

- $U = \{u_i\}$ – множество абонентов сети;
- $S = \{s_j\}$ – множество серверов инфокоммуникационной системы;
- $Z = \{z_i\}$ – множество сетевых узлов, представленных активным оборудованием;
- $B = \{b_{ij}\}$ – множество потенциальных каналов связи, обеспечивающих связь сетевых узлов между собой, где $b_{ij} = (z_i, z_j)$;
- $Z_j^U = \{z_{ij}^U\}$ – подмножество сетевых узлов (коммутаторов) $Z_j^U \subseteq Z$, к которым могут быть подключены абоненты сети, где $u_j \in U$;
- $Z_j^S = \{z_{ij}^S\}$ – подмножество сетевых узлов и мест $Z_j^S \subseteq Z$, где могут быть размещены (подключены к сети) серверы инфокоммуникационной системы, где $s_j \in S$.

В состав сети также входят элементы структурированной кабельной системы и кабельная канализация, структуру которых необходимо определить при решении задачи. Для их описания введем обозначения:

- $Q = \{q_i\}$ – множество мест возможной установки патч-панелей, которые совпадают с возможными местами установки активного сетевого оборудования;
- $Q^U = \{q_i^U\}$ – множество точек сопряжения с каналами рабочей зоны;
- $Q_j^Z = \{q_{ij}^Z\}$ – подмножество потенциальных мест установки оборудования сетевого узла, где $Q_j^Z \subseteq Q$ и $z_j \in Z$;
- $W = \{w_i\}$ – множество каналов (лотков) кабельной канализации;
- $Q^X = \{q_i^X\}$ – множество точек разветвления кабельной канализации;
- $D(w_i)$ – стоимость монтажа каналов (лотков) кабельной канализации;
- χ_j – удельная стоимость монтажа кабеля в канале (лотке) кабельной канализации, где $w_j \in W$;
- $C(w_i)$ – емкости каналов (лотков) кабельной канализации.

Необходимо найти:

- места установки активного сетевого оборудования;
- топологию Ethernet – сети;
- результирующую топологию кабельной канализации;
- маршруты прокладки кабелей.

Критерием оптимальности является минимум затрат на строительство сети с учетом интенсивности трафика, передаваемого в сети при информационном взаимодействии абонентов с серверами услуг и емкости каналов кабельной канализации.

III. Моделирование синтезируемой инфокоммуникационной системы с помощью многослойного графа

При решении задачи предполагается нахождение совокупности структур на различных логических и физических уровнях сети. При этом необходимо принимать во внимание существующие зависимости между этими структурами и влияние, которое они оказывают друг на друга. Решение задачи синтеза информационно-телекоммуникационных систем, содержащих наложенные сети, возможно с применением математических моделей в виде многослойного графа [2].

Для описания телекоммуникационной системы многослойным графом необходимо выполнить следующие операции (рис. 1) [11]:

1. Выделить в моделируемой телекоммуникационной системе множество уровней.
2. Описать топологию каждого уровня с помощью классического графа.
3. Выделить между объектами различных уровней логические, функциональные и физические связи и описать их с помощью графов.

4. Присвоить ребрам и вершинам графа набор параметров, характеризующих параметры соответствующих объектов и меж объектных связей, составляющих интерес для моделирования.

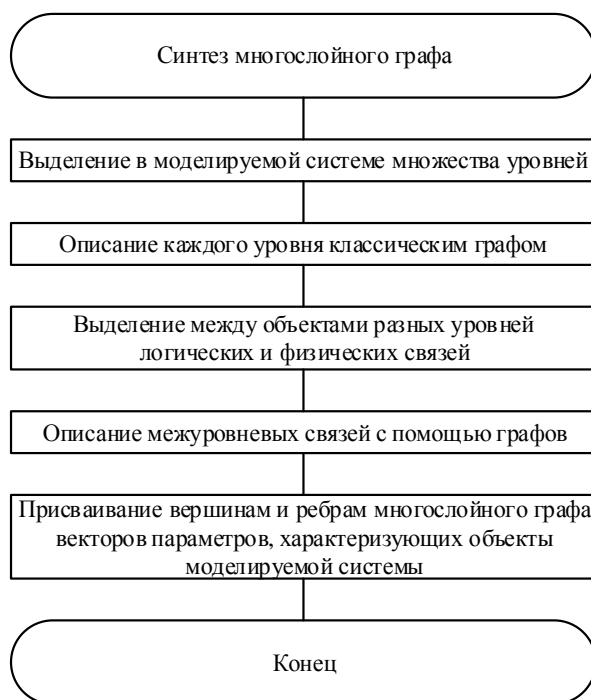


Рис. 1. Схема метода описания телекоммуникационной системы многослойным графом

Согласно общей методике, представленной выше, в структуре проектируемой системы можно выделить несколько уровней, которые представимы наложенными сетями. К этим уровням относятся:

– уровень кабельной канализации, представленный сетью кабельных каналов, обеспечивающий связь аппаратных, где территориально устанавливается активное сетевое оборудование и серверы;

– уровень сети Ethernet, обеспечивающий обмен данными между элементами системы с использованием технологии Ethernet и связь конечных хостов посредством Ethernet-коммутаторов;

– уровень инфокоммуникационной системы, которая определяет информационные взаимосвязи и взаимодействия элементов инфокоммуникационной системы. На этом уровне определяются информационные потоки, циркулирующие в сети и влияющие на оптимальные структурные свойства остальных уровней системы.

Следующим шагом описания синтезируемой системы моделью, представленной в виде многослойного графа, является описание наложенных сетей каждого из уровней графом соответствующего слоя многослойного графа.

Граф нижнего слоя $\Gamma^C = (V^C, E^C)$ описывает топологию кабельной канализации. Этот граф определяет топологию и маршруты прокладки кабелей. Данный граф содержит множество вершин $V^C = \{v_i^C\}$, которое можно разбить на два подмножества:

$V^{CX} = \{v_i^{CX}\}$ – множество вершин, соответствующих точкам разветвления каналов кабельной канализации:

$$q_i^X \Leftrightarrow v_i^{CX}, \quad \forall q_i^X \in Q^X, v_i^{CX} \in V^{CX}; \quad (1)$$

$V^{CQ} = \{v_i^{CQ}\}$ – множество вершин, соответствующих входам и выходам кабельной канализации в места установки активного сетевого оборудования, патч-панелей и точек сопряжения с каналами рабочей зоны:

$$q_i \Leftrightarrow v_i^{CQ}, \quad \forall q_i \in QUQ^U, v_i^{CQ} \in V^{CQ}. \quad (2)$$

Ребра $E^C = \{e_i^C\}$ графа нижнего слоя Γ^C соответствуют каналам кабельной канализации как уже существующих, так и планируемые к монтажу:

$$w_i \Leftrightarrow e_i^C, \quad \forall w_i \in W, e_i^C \in E^C. \quad (3)$$

Ребрам графа присваиваются следующие параметры:

$D(e_i^C)$ – стоимость монтажа кабельного канала между двумя точками разветвления кабельной канализации. Для уже существующего кабельного канала стоимость монтажа равна нулю:

$$D(e_i^C) = D(w_i), \quad \forall w_i \in W; \quad (4)$$

$C(e_i^C)$ – емкость кабельного канала, определяющая максимальное количество кабелей, которые могут быть уложены (затянуты) в кабельный канал:

$$C(e_i^C) = C(w_i), \quad \forall w_i \in W. \quad (5)$$

Путь прокладки отдельного кабеля структурированной кабельной системы представляется путем в этом графе. С целью учета расходов на прокладку кабеля в кабельном канале введем дополнительный параметр, приписываемый ребрам графа кабельной канализации

$D^l(e_i^C)$ – стоимость прокладки кабеля в кабельном канале, состоящей из стоимости самого кабеля и стоимости монтажных работ

$$D^l(e_i^C) = \chi_i L(w_i), \quad \forall w_i \in W, \quad (6)$$

где $L(w_i)$ – длина кабельного канала (лотка).

Граф второго слоя $\Gamma^E = (V^E, E^E)$ описывает топологию сети Ethernet. Этот граф определяет каким образом соединены между собой коммутаторы и как подключены хосты к коммутаторам. Данный граф содержит множество вершин, которые можно разделить на два подмножества:

$V^{EZ} = \{v_i^{EZ}\}$ – вершины графа слоя сети Ethernet, которые соответствуют коммутаторам:

$$z_i \Leftrightarrow v_i^{EZ}, \quad \forall z_i \in \bigcup_{j, u_i \in U} Z_j^U, v_i^{EZ} \in V^{EZ}; \quad (7)$$

$V^{EU} = \{v_i^{EU}\}$ – вершины, соответствующие конечным узлам сети и хостам:

$$u_i \Leftrightarrow v_i^{EU}, \quad \forall u_i \in U, v_i^{EU} \in V^{EU}. \quad (8)$$

Ребра графа соответствуют потенциальным связям между коммутаторами и хостами. Множество ребер графа состоит из

$E^{EU} = \{e_i^{EU}\}$ – подмножества ребер, связывающих хосты и коммутаторы и отображающие потенциальные варианты подключения абонентских узлов к Ethernet-коммутаторам:

$$\forall u_j \in U, \forall z_k \in Z_j^U, \exists e_i^{EU} \in E^{EU}, e_i^{EU} = (v_j, v_k), v_j \in V^{EU}, v_k \in V^{EZ}. \quad (9)$$

В исходной структуре графа допускается наличие ребер, связывающих хост с несколькими коммутаторами, но в результирующем многослойном графе, получаемом в результате решения задачи, допускается только одно ребро, инцидентное вершинам-хостам.

$E^{EZ} = \{e_i^{EZ}\}$ – подмножество ребер, соответствующих потенциальным каналам связи между коммутаторами:

$$b_i \Leftrightarrow e_i^{EZ}, \quad \forall b_i \in B, e_i^{EZ} \in E^{EZ}. \quad (10)$$

Граф верхнего слоя $\Gamma^F = (V^F, E^F)$ описывает уровень инфокоммуникационной системы. Он содержит вершины:

$V^{FS} = \{v_i^{FS}\}$ – вершины графа, соответствующие серверам инфокоммуникационной системы:

$$s_i \Leftrightarrow v_i^{FS}, \quad \forall s_i \in S, v_i^{FS} \in V^{FS}; \quad (11)$$

$V^{FU} = \{v_i^{FU}\}$ – вершины графа, соответствующие абонентским узлам инфокоммуникационной системы:

$$u_i \Leftrightarrow v_i^{FU}, \quad \forall u_i \in U, v_i^{FU} \in V^{FU}. \quad (12)$$

Ребра многослойного графа описывают возникающие информационные взаимодействия абонентских узлов с серверами при функционировании инфокоммуникационной системы.

Следующим этапом является синтез графа $\Gamma' = (V', E')$, соединяющего между собой вершины графов разных слоев многослойного графа, который описывает логические и физические связи между элементами различных уровней.

Между слоем, описывающим уровень кабельной канализации, и слоем, соответствующим уровню сети Ethernet, вводится множество ребер, связывающих вершины V^C графа Γ^C с вершинами V^E графа Γ^E , которые соответствуют логической связи «расположен» и описывают место подключения абонентских узлов к точке сопряжения кабельной канализации с кабельными каналами рабочей зоны, точек выхода кабельной канализации и патч-панелей. Для этого проведем следующие операции:

– каждую вершину v_i^{EZ} графа Γ^E , которая соответствует Ethernet-коммутатору, связывают ребрами $e'_{ij}{}^{EQ} = (v_i^{EZ}, v_j^{CQ})$ с вершинами v_j^{CQ} графа Γ^C , соответствующими возможным местам установки активного сетевого оборудования:

$$\forall v_i^{EZ} \in V^{EZ} \quad \exists e'_{ij}{}^{EQ} \in E', q_{ij}^Z \in Q_j^Z; \quad (13)$$

– каждую вершину v_i^{EU} графа Γ^E , которая соответствует абонентским узлам, связывают ребром с вершиной v_i^{CQ} графа Γ^C , соответствующей месту его подключения к точке сопряжения кабельной канализации с кабельными каналами рабочей зоны.

Между слоем, соответствующим уровню сети Ethernet, и слоем, описывающим уровень инфокоммуникационной системы, вводится множество ребер, связывающих вершины V^F графа Γ^F с вершинами V^E графа Γ^E , которые соответствуют логической связи «расположен или подключен» и описывают местоположение различных элементов инфокоммуникационной систем в структуре сети. Все множество ребер, которые вводятся в состав графа Γ' и связывают между собой графы Γ^F и Γ^E , можно разбить на два подмножества:

$e'_{ij}{}^{FU} = (v_i^{FU}, v_j^{EU})$ – множество ребер, связывающих вершины $v_i^{FU} \in V^{FU}$ графа Γ^F , соответствующие абонентским узлам $u_i \in U$ инфокоммуникационной системы, с вершинами $v_j^{EU} \in V^{EU}$ графа Γ^E , которые соответствуют узлам сети Ethernet, где эти абонентские узлы подключены. В этом множестве ребер каждая вершина графа Γ^F связана с одной из вершин графа Γ^E

$$\forall u_i \in U \quad \exists e'_{ij}{}^{FU} = (v_i^{FU}, v_j^{EU}), \quad v_i^{FU} \Leftrightarrow u_i, v_j^{EU} \Leftrightarrow u_i; \quad (14)$$

$e'_{ij}^S = (v_i^{FS}, v_j^{EZ})$ – множество ребер, связывающих вершины $v_i^{FS} \in V^{FS}$ графа Γ^F , соответствующие серверам $s_i \in S$ инфокоммуникационной системы, с подмножеством вершин $v_j^{EZ} \in V^{EZ}$ графа Γ^E , которые соответствуют коммутаторам сети, к которым потенциально могут быть подключены серверы в случае, если они находятся территориально в одном и том же помещении с коммутатором

$$\forall s_i \in S \quad \exists e'_{ij}^S = (v_i^{FS}, v_j^{EZ}), \quad v_i^{FS} \Leftrightarrow s_i, v_j^{EZ} \Leftrightarrow z_{ji}^S, z_{ji}^S \in Z_i^S. \quad (15)$$

Если сервер допускает возможность размещения в различных с коммутатором помещениях, то его необходимо описывать аналогично абонентскому узлу, как показано ранее. В этом множестве ребер каждая вершина графа Γ^F может быть связана с несколькими вершинами графа Γ^E .

Синтезированный многослойный граф используется для решения задачи проектирования информационно-телекоммуникационной системы.

Решение указанной задачи сводится к нахождению многослойного подграфа минимального веса, обеспечивающего пропускание требуемых потоков с учетом требований к структуре многослойного графа при выполнении ограничений на пропускную способность ребер графа как на уровне сети Ethernet, так и на уровне кабельной канализации.

Выводы

Инфокоммуникационную систему предприятия нужно рассматривать как систему, содержащую наложенные сети. При планировании и проектировании наложенных сетей необходимо учитывать процессы, протекающие на различных ее уровнях, и определять топологии каждой из ее сетей. Для решения этой задачи можно использовать модель в виде многослойного графа, которая позволяет адекватно описать структуру проектируемой сети, учесть взаимосвязь процессов на разных ее уровнях и представить проектируемую инфокоммуникационную систему как единый целостный объект.

При описании инфокоммуникационной системы многослойный граф должен содержать следующие слои: уровень кабельной канализации, уровень сети Ethernet, уровень инфокоммуникационной системы.

За счет синтеза потоковой модели на многослойном графе решаемую задачу можно свести к задаче нахождения многослойного подграфа минимальной стоимости и распределения потоков в нем, обеспечивающего выполнение ограничений, накладываемых потоковой моделью. Представление синтезируемой системы как единого целостного объекта позволяет получить более эффективное решение, чем подход, базирующийся на декомпозиции.

Список литературы:

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб: Издательство «Питер», 1999. – 672 с.
2. Агеев Д.В. Моделирование современных телекоммуникационных систем многослойными графами [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1(1) – С. 23–34. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ageyev_simulation.pdf.
3. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.П. Структурированные кабельные системы. Стандарты, компоненты, проектирование, монтаж и техническая эксплуатация. – М.: КомпьютерПресс, 1999. – 482 с.
4. Пятаев О.В., Семашко А.В. Особенности формализации задачи оптимизации структуры кампусных сетей // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2001. – Т.4. – С. 950–959. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/086.pdf>.
5. Andrews M., Zhang L. The access network design problem // Proceedings 39th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – IEEE, 1998. – С. 40–49.
6. Jothi R., Raghavachari B. Design of local access networks // Fifteenth IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems. – 2003. – С. 883–888.
7. Sahasrabudde L., Ramaswami R., Mukherjee B. Fault Management in IP-Over-WDM Networks: WDM Protection Versus IP Restoration // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2002. – Vol. 20, Issue 1. – P. 21–33.
8. Haider M., Mazurek M., Dymora P. Designing of multichannel optical communication systems topologies criteria optimization // Informatica. – 2003. – Vol. 1. – P. 277–284.
9. Knippel A., Lardeux B. The Multi-Layered Network Design Problem // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 138, Issue 1. – P. 87–99.
10. Guolong Zhu, Qingji Zeng, Tong Ye, Junjie Yang Joint network design in multilayer networks // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5282. – P. 460–469.
11. Агеев Д.В. Метод проектирования телекоммуникационных систем с использованием потоковой модели для многослойного графа [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 2 (2). – С. 7 – 22. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_ageyev_layer.pdf.