Стерін Вячеслав Леонідович. Динамічні моделі та метод структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем.- Дис. канд. техн. наук: 05.12.02, Харк. нац. ун-т радіоелектрон. - Х., 2014.- 145 с.

На правах рукописи

СТЕРИН ВЯЧЕСЛАВ ЛЕОНИДОВИЧ

УДК 621.391

**ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОД СТРУКТУРНОГО И  
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ**

**СИСТЕМ**

Специальность: 05.12.02 - телекоммуникационные системы и сети

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель ЛЕМЕШКО Александр Витальевич, доктор технических наук, профессор

Харьков - 2013

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ 5](#bookmark3)

[ВВЕДЕНИЕ 8](#bookmark4)

[РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ СТРУКТУРНО­ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ 16](#bookmark6)

1. [Анализ задач телекоммуникационных систем в современном информа­ционном обществе 16](#bookmark7)
2. [Обзор основных технологических концепций, касающихся структур­но-функционального синтеза телекоммуникационных систем 22](#bookmark8)
3. [Характеристика задач структурного и функционального синтеза теле­коммуникационных систем и обзор методов их решения 29](#bookmark9)
4. [Постановка научной задачи и формулировка частных задач исследова­ния 35](#bookmark10)
5. [Выводы по первому разделу 38](#bookmark11)

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНИКО­ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО

СИНТЕЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ 41

1. [Графовая модель проектируемой телекоммуникационной систе­мы 42](#bookmark14)
2. Динамическая модель синтеза топологии и выбора

пропускных способностей трактов передачи ТКС 44

1. [Потоковые модели управления трафиком в ТКС 48](#bookmark25)
2. [Модель маршрутизации с предвычислением путей 49](#bookmark26)
3. [Модель одноадресной маршрутизации 50](#bookmark27)
4. Модели многоадресной и широковещательной

маршрутизации 51

1. Модель многопутевой маршрутизации с ограничением

интенсивности трафика на границе транспортной сети 54

1. [Формулировка системы критериев оптимальности решений по струк­турно-функциональному синтезу ТКС 55](#bookmark30)
2. Модель комплексного решения задач структурного и

функционального синтеза ТКС 62

1. [Выводы по второму разделу 69](#bookmark34)

[РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ВИРТУАЛЬНЫХ ЧАСТНЫХ СЕТЕЙ 72](#bookmark36)

1. [Анализ вариантов построения виртуальных частных сетей 73](#bookmark38)
2. [Особенности построения виртуальных частных сетей 73](#bookmark39)
3. [Классификация виртуальных частных сетей 75](#bookmark40)
4. [Анализ требований, выдвигаемых к виртуальным частным се­тям 81](#bookmark41)
   1. Динамическая математическая модель структурно-функционального

синтеза виртуальных частных сетей 82

* + 1. Структурное описание сети провайдера и виртуальных частных

сетей в виде графа 82

* + 1. [Функциональное описание процесса синтеза виртуальных част­ных сетей 86](#bookmark45)
  1. [Выводы по третьему разделу 94](#bookmark48)

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТРУКТУРНОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕШЕНИЙ 97

4.1. Метод структурного и функционального синтеза телекоммуникацион­

ных систем 97

1. [Оценка эффективности предложенного метода структурно­функционального синтеза телекоммуникационных систем 109](#bookmark52)
2. [Выбор показателей эффективности процесса структурно­функционального синтеза телекоммуникационных систем 109](#bookmark53)
3. Исследование предложенного метода структурно-

функционального синтеза телекоммуникационных систем 112

1. Разработка рекомендаций по практическому использованию предло­женных моделей и метода структурно-функционального синтеза телекомму-

никационных систем 126

1. [Выводы по четвертому разделу 128](#bookmark56)

[ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 130](#bookmark57)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 133](#bookmark58)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



**ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

|  |  |
| --- | --- |
| ВПС | Выбор пропускных способностей |
| ВТ | Выбор топологии |
| ГИИ | Г лобальная информационная инфраструк­тура |
| ЛД | Линия доступа |
| МСЭ | Международный союз электросвязи |
| ОН | Ограничение нагрузки |
| ПС | Пропускная способность |
| РП | Распределение потоков |
| СД | Сеть доступа |
| СМО | Система массового обслуживания |
| ССУ | Система сетевого управления |
| ТКС | Телекоммуникационная система |
| ТП | Тракт передачи |
| ТТКС | Транспортная телекоммуникационная сеть |
| ЭМВОС | Эталонная модель взаимодействия откры­тых систем |
| ATM (Asynchronous Transfer Mode) | Режим асинхронной передачи |
| CE (Customer Edge router) | Приграничный клиентский маршрутизатор |
| DiffServ (Differentiated Services) | Дифференцированные услуги |

Согласованная выходная скорость

Протокол маршрутизации внутреннего шлюза

































Интегрированные услуги Протокол сетевого уровня Internet Согласованная входная скорость Международный союз электросвязи

Приграничный маршрутизатор в MPLS- сети

Путь коммутации по меткам

Технология многопротокольной коммута­ции по меткам

Сеть следующего поколения

Сетевая инженерия Планирование сети

Протокол маршрутизации по кратчайшему пути

Приграничные устройства сети сервис- провайдера

Протокол маршрутизации информации Протокол резервирования ресурсов

Договор об уровне сервиса

Инжиниринг трафика Качество обслуживания Виртуальная частная сеть











Таблица маршрутизации и передачи паке­тов в сети MPLS-VPN

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы**. Современные мультисервисные телеком­муникационные системы (ТКС) являются важным системообразующим слагаемым глобальной информационной инфраструктуры (ГИИ) как национального, так и международного уровня [1 -3]. Именно на ТКС воз­лагаются ключевые функции с точки зрения организации информацион­ного взаимодействия между элементами ГИИ путем создания высоко­скоростной транспортной среды. Постоянный рост требований к эффек­тивности функционирования ТКС, что во многом сопровождается рас­ширением возможностей по поддержке качества обслуживания (Qua lity of Service, QoS) [4-6], накладывает определенный отпечаток и на про­цессы проектирования подобного рода систем. Именно на этапе проек­тирования закладывается необходимый резерв сетевого ресурса, кото­рый должен оптимально распределяться, а при необходимости и нара­щиваться в процессе функционирования ТКС [7 -10].

Важно отметить, что процесс проектирования ТКС не должен рассматриваться как событие, связанное с синтезом сети исключительно «с нуля». Как правило, трактовка данного термина значительно шире и охватывает задачи перепланировки, реструктуризации существующих ТКС или создания виртуальный частных сетей в интересах отдельных фирм и компаний на базе существующей телекоммуникационной инфра­структуры того или иного оператора связи.

В общем случае при решении задач проектирования ТКС необхо­димо учитывать множество противоречивых по своему содержанию тре­бований: начиная от максимизации числа пользователей, охваченных услугами связи, поддержания заданного уровня качества обслуживания, и заканчивая минимизацией суммарной стоимости создаваемой системы. В связи с этим важно задействовать возможности системного подхода как на этапе формализации задач проектирования, так и при обеспече­нии их эффективного решения. Нередко при решении задач проектиро­вания ТКС на уровнях ее структурного и функционального синтеза не­редко находили и находят свое применение эвристические подходы [11 - 13], основанные больше на инженерной интуиции, чем на теоретически обоснованных решениях, что в целом негативно сказывалось на эффек­тивности конечных проектных решений. Поэтому тема диссертационной работы, которая связана с решением научно-прикладной задачи по раз­работке динамических математических моделей и метода структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем, является ак­туальной.

**Связь работы с научными программами, планами и темами.**

Диссертационная работа непосредственно связана с реализацией основ­ных положений «Концепции национальной информационной политики», «Концепции конвергенции телефонных сетей и сетей с пакетной комму­тацией в Украине» и «Основных принципов развития информационного общества в Украине на 2007-2015 годы». Результаты диссертационной работы использованы в ходе выполнения научно-исследовательской ра­боты № 235-1 «Методы проектирования телекоммуникационных сетей NGN и управления их ресурсами» (№ ДР 0109U000662), в которой автор выступал соисполнителем. Получен патент на полезную модель «Способ маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационных се­тях». Предложенные в работе модели и метод структурно - функционального синтеза ТКС использованы в учебном процессе ка­федры телекоммуникационных систем ХНУРЭ. Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

**Цель работы**: повышение эффективности процесса структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем.

В ходе решения поставленной научной задачи сформулированы и успешно решены частные задачи исследования:

* анализ известных математических моделей и методов структур­ного и функционального синтеза телекоммуникационных систем, срав­нение их преимуществ и недостатков;
* разработка системы динамических технико -экономических мо­делей структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем;
* разработка динамической математической модели структурно - функционального синтеза виртуальных частных сетей;
* совершенствование метода структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем;
* оценка эффективности процесса структурного и функциональ­ного синтеза ТКС, организованного в рамках предложенных моделей и метода;
* разработка рекомендаций по практическому использованию решений, предложенных в диссертации.

**Объект исследования**: процесс структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем.

**Предмет исследования**: динамические модели и метод структур­ного и функционального синтеза телекоммуникационных систем.

**Методы исследования.** В работе нашли свое применение целый ряд современных методов исследования. При разработке динамических моделей структурного и функционального синтеза ТКС был использован аппарат теории множеств, теории дифференциально-разностных уравнений. При усовершенствовании метода структурно-функционального синтеза исполь­зованы возможности теории оптимального управления и методов математи­ческого (линейного, нелинейного, смешанного) программирования. Для оценки эффективности полученных решений использовались методы тео­рии телетрафика, модели систем массового обслуживания.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. Впервые предложена система динамических технико - экономи­ческих моделей структурного и функционального синтеза телекоммуни­кационных систем (ТКС), новизна которых состоит в том, что для опи­сания процессов перераспределения капиталовложений на различных этапах проектирования ТКС и наращивания пропускных способностей трактов передачи использована система линейных разностных уравне­ний, а для описания процессов маршрутизации и ограничения трафика на границе транспортной сети применена система линейных алгебраиче­ских уравнений состояния. Использование модели позволило обеспечить более полный учет технико-экономических особенностей процессов структурного и функционального синтеза телекоммуникационных си­стем.
2. Впервые предложена динамическая математическая модель структурно-функционального синтеза виртуальных частных сетей, новиз­на которой заключается в том, что она представлена как системой ли­нейных разностных уравнений для описания процесса перераспределе­ния пропускных способностей трактов передачи сети сервис провайдера между различными виртуальными частными сетями, так и нелинейными алгебраическими уравнениями для описания процессов маршрутизации потоков и управления перегрузкой. Использование модели позволяет обеспечить более эффективное управление ресурсами сети провайдера при создании виртуальных частных сетей за счет более полного учета динамики процессов информационного обмена, протекающих в ней.
3. Усовершенствован метод структурного и функционального синте­за телекоммуникационных систем, новизна которого заключается в том, что он учитывает многоэтапность процесса структурного и функционального синтеза ТКС, обеспечивая согласованное решение таких важных задач, как распределение капиталовложений между этапами проектирования, выбор топологии транспортной сети и пропускных способностей ее трактов пере­дачи, распределение потоков на уровне транспортной сети (маршрутизация) и доступа, определение порядка подключения отдельных абонентов и сетей доступа к узлам транспортной сети. Использование предложенного метода позволяет обеспечить более эффективное использование имеющегося тех­нико-экономического ресурса при проектировании ТКС.

**Научное значение** результатов работы заключается в дальней­шем развитии элементов теории, моделей и метода структурного и функционального синтеза ТКС. Использование разработанных моделей и метода позволило придать динамический характер и обеспечить боль­шую согласованность в решении отдельных задач структурного и функ­ционального синтеза ТКС.

**Практическая значимость** результатов работы заключается в том, что предложенные модели и метод могут и должны быть положены в основу соответствующих систем автоматизированного проектирования телекоммуникационных систем и сетей. Реализация на практике полу­ченных решений позволяет, как показали результаты проведенных ис­следований, более эффективно использовать имеющийся финансовый и технологический ресурс при проектировании ТКС. По результатам дис­сертации получен патент на полезную модель. Результаты диссертаци­онных исследований реализованы в ходе выполнения научно - исследовательской работы № 235 -1 «Методы проектирования телеком­муникационных сетей NGN и управления их ресурсами» (№ ДР 0109U000662), в учебном процессе кафедры телекоммуникационных си­стем Харьковского национального университета радиоэлектроники в лекционном курсе «Методы проектирования телекоммуникационных си­стем и сетей», при обосновании проектных решений в ходе развития те­лекоммуникационной инфраструктуры АО «Киевстар».

**Обоснованность и достоверность** новых научных и практиче­ских результатов, полученных в данной диссертационной работе, под­тверждалась корректным принятием гипотез, необходимых допущений и приближений; совпадением в частных случаях с известными ранее ре­зультатами; использованием положений хорошо апробированного мате­матического аппарата - теории телетрафика, теории дифференциально - разностных уравнений, теории оптимального управления и методов ма­тематического программирования, а также четкой физической интерпре­тацией результатов исследования, полученных в работе.

**Личный вклад соискателя.** Все научные результаты, представ­ленные в диссертационной работе, соискатель получил самостоятельно [14-20]. Кроме того, в работе [14] автором проведен обзор методов обес­печения качества обслуживания при проектировании и развертывании сетей мобильной связи четвертого поколения; в статье [15] соискателем впервые предложена динамическая математическая модель структурного и функционального синтеза ТКС; в статье [16] соискателем предложена динамическая модель структурно-функционального синтеза и оптимиза­ции ТКС, в рамках которой уже не требуется предварительное решение задачи распределения капиталовложений между этапами проектирова­ния, кроме того, модификация также коснулась пересмотра критерия оп­тимальности проектных решений; в работе [17] автором проанализиро­вана возможность и оценена эффективность использования модели ба­лансировки нагрузки по критерию минимальности длин очередей на маршрутизаторах в ходе решения задачи распределения потоков при проектирования ТКС; в публикации [18] автором осуществлено сравне­ние эффективности решений задач распределения потоков при их мно­гопутевой маршрутизации по различным критериям, связанных с длина­ми очередей на маршрутизаторах ТКС; в публикации [19] автором про­веден анализ динамической модели согласованного решения задач структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуника­ционной сети.

Апробация основных положений диссертационной работы прово­дилась в ходе семи конференций [21 -27], а именно на УШ Международ­ной научно-технической конференции "Современные информационно - коммуникационные технологии" - COMINFO'2012 (2012 г., Крым-Ялта- Ливадия, Государственный университет информационно - коммуникационных технологий); ІХ научной конференции "Современ­ные тенденции развития технологий в инфокоммуникациях и образова­нии" (2012 г., Киев, ГУИКТ); 67-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, аспи­рантов и студентов (2012 г., Одесса, Одесская национальная академия связи им. А.С Попова); XIIth International Conference «THE EXPERIENCE OF DESIGNING AND APPLICATION OF CAD SYSTEMS IN MICROELECTRONICS» (2013 г., Поляна-Свалява-Львов, Националь­ный университет «Львовская политехника»); II-ой Международной научно-технической и научно-методической конференции "Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании" (2013 г., Санкт - Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет теле­коммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича); 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013, Севастополь, Севастопольский национальный техниче­ский университет); X Международной научно-технической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ'2013" (2013 г., Владимир, Владимирский государственный уни­верситет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых).

**Публикации**. По результатам диссертационных исследований опубликовано 15 научных работ [14-28], из которых 7 статей в специа­лизированных научных изданиях Украины (5 статей) [14 -17, 20] и Рос­сийской Федерации (2 статьи) [18, 19]; 7 материалов конференций, из которых пять проходило в Украине [21 -24, 26], а две [25, 27] в Россий­ской Федерации. Два доклада представлены на конференциях, которые проходили под эгидой IEEE [24, 26], они выложены в базах IEEEXplore и Scopus. Получен патент на полезную модель [28].

**ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

В диссертационной работе решена *актуальная научно-прикладная задача,* состоящая в разработке динамических математических моделей и метода структурного и функционального синтеза телекоммуникацион­ных систем. По результатам решения поставленной научно-прикладной задачи можно сделать ряд важных выводов.

1. Показано, что необходимый запас сетевого ресурса ТКС заклады­вается именно на стадии ее проектирования, которое должно основываться на согласованном решении взаимодополняющих друг друга технико­экономических задач: распределения капиталовложений между этапами проектирования и отдельными создаваемыми трактами передачи, выбора топологии и пропускных способностей трактов передач, управления тра­фиком внутри и на границе транспортной сети, обеспечения QoS и др. Это­го можно достичь только основываясь на использовании соответствующих математических моделей и методов, которые формализуют рассматривае­мые задачи как с точки зрения их постановки, так и, что немаловажно, ва­риантов предполагаемого решения.
2. Впервые предложена система динамических технико - экономи­ческих моделей структурного и функционального синтеза телекоммуни­кационных систем, новизна которых состоит в том, что для описания процессов перераспределения капиталовложений на различных этапах проектирования ТКС и наращивания пропускных способностей трактов передачи использована система линейных разностных уравнений, а для описания процессов маршрутизации и ограничения трафика на границе транспортной сети применена система линейных алгебраических урав­нений состояния. Использование модели позволило обеспечить более полный учет технико-экономических особенностей процессов структур­ного и функционального синтеза телекоммуникационных систем.
3. Впервые предложена динамическая математическая модель структурно-функционального синтеза виртуальных частных сетей, новиз­на которой заключается в том, что она представлена как системой ли­нейных разностных уравнений для описания процесса перераспределе­ния пропускных способностей трактов передачи сети сервис провайдера между различными виртуальными частными сетями, так и нелинейными алгебраическими уравнениями для описания процессов маршрутизации потоков и управления перегрузкой. Использование модели позволяет обеспечить более эффективное управление ресурсами сети провайдера при создании виртуальных частных сетей за счет более полного учета динамики процессов информационного обмена, протекающих в ней.
4. Усовершенствован метод структурного и функционального синте­за телекоммуникационных систем, новизна которого заключается в том, что он учитывает многоэтапность процесса структурного и функционального синтеза ТКС, обеспечивая согласованное решение таких важных задач, как распределение капиталовложений между этапами проектирования, выбор топологии транспортной сети и пропускных способностей ее трактов пере­дачи, распределение потоков на уровне транспортной сети (маршрутизация) и доступа, определение порядка подключения отдельных абонентов и сетей доступа к узлам транспортной сети. Использование предложенного метода позволяет обеспечить более эффективное использование имеющегося тех­нико-экономического ресурса при проектировании ТКС.
5. Результаты исследований показали, что использование предложен­ного метода позволяет обеспечить более эффективное использование име­ющегося технико-экономического ресурса при проектировании ТКС и син­тезе как одноранговых, так и оверлейных виртуальных частных сетей.
6. Диссертационная работа непосредственно связана с реализацией основных положений «Концепции национальной информационной по­литики», «Концепции конвергенции телефонных сетей и сетей с пакет­ной коммутацией в Украине» и «Основных принципов развития инфор­мационного общества в Украине на 2007-2015 годы». Результаты дис­сертационной работы использованы в ходе выполнения научно­исследовательской работы: № 235-1 «Методы проектирования телеком­муникационных сетей NGN и управления их ресурсами» (№ ДР 0109U000662), в которой автор выступал соисполнителем. Получен па­тент на полезную модель «Способ маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационных сетях». Предложенные в работе мо­дели и метод структурно-функционального синтеза ТКС использованы в учебном процессе кафедры телекоммуникационных систем ХНУРЭ. Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено соответ­ствующими актами.

По результатам диссертационных исследований опубликовано 15 научных работ [14-28], из которых 7 статей в специализированных научных изданиях Украины (5 статей) [14 -17, 20] и Российской Федера­ции (2 статьи) [18, 19]; 7 материалов конференций, из которых пять про­ходило в Украине [21-24, 26], а две [25, 27] в Российской Федерации. Два доклада представлены на конференциях, которые проходили под эгидой IEEE [24, 26], они выложены в базах IEEEXplore и Scopus. Полу­чен патент на полезную модель [28].