*Первая миля, 2021,Часть 1, №5, с. 40 – 48, Часть 2, №6, с. 48 – 55, Часть 3, №7, с. 56 – 64.*

Соколов Н.А.

**Задачи планирования телекоммуникационных сетей**

Современному этапу развития телекоммуникационных сетей свойственен ряд особенностей, обусловленных разными причинами. Эти особенности должны учитываться и при постановке задач планирования телекоммуникационных сетей. По мнению автора статьи, следует обратить внимание, по крайней на мере, на три следующих обстоятельства. Во-первых, в городах и в сельской местности уже сложилась инфраструктура, которую практически невозможно изменить, что следует учитывать при постановке задач, связанных с выбором структурных характеристик телекоммуникационных сетей. Во-вторых, характер мультисервисного трафика и темпы его роста плохо предсказуемы, что стимулирует пересмотр методологического подхода к оценке пропускной способности транспортных ресурсов и производительности аппаратно-программных средств, выполняющих функции коммутации и обработки информации. В-третьих, возрастают риски устойчивости функционирования телекоммуникационных сетей, что порождает актуальность исследования дальнейших путей по развитию системы связи в целом. Эти три аспекта развития телекоммуникационных сетей, трансформирующие задачи по их планированию, рассматриваются в данной статье.

**Выбор модели**

Для решения большей части задач, возникающих в процессе планирования телекоммуникационных сетей, используется математический аппарат [1]. Он применяется к математическим моделям [2], которые должны отражать существенные аспекты телекоммуникационной сети с точки зрения предварительно сформулированных целей. В теории сетей связи [3, 4, 5] разработан ряд моделей, которые предназначены для решения различных задач. На рисунке 1 показана модель телекоммуникационной сети, основанная на тех материалах рекомендаций Международного союза электросвязи (МСЭ) серии Y [6], которые посвящены глобальной информационной инфраструктуре. Над каждым компонентом указано его название на английском языке.



Рисунок 1. Модель телекоммуникационной сети, предложенная МСЭ

Рассматриваемая модель удачнее всего отображает принципы построения телефонной сети общего пользования. Сеть в помещении пользователя располагается между терминалом пользователя и телефонной розеткой. Между телефонной розеткой и кроссом узла коммутации (УК) создается сеть доступа. В простейшем случае она образуется совокупностью абонентских линий. В городских телефонных сетях абонентские линии ранее формировались за счет использования двухпроводных физических цепей в многопарном кабеле с медными проводниками. Далее располагается базовая сеть, которая – теоретически! – охватывает весь земной шар. Типичным примером средств поддержки услуг служит центр обслуживания вызовов, адресованных сотрудникам экстренных или справочных служб.

Если соединение в телефонной сети общего пользования устанавливается между терминалами, включенными в один и тот же УК, то в базовой сети задействуется только один из множества ее элементов. Если в телефонной сети общего пользования устанавливается соединение между терминалами, находящимися, например, на разных континентах, то в базовой сети будет задействовано значительное количество УК и соединяющих их трактов обмена информацией. По этой причине в некоторых моделях базовая сеть делится на несколько компонентов. Подобное деление осуществляется либо по иерархическим уровням (местная, междугородная и международная сети), либо по границам ответственности между разными Операторами связи. Таким образом, внутри компонента "Базовая сеть", при необходимости, можно выделить несколько элементов.

Пример такой детализации модели телекоммуникационной сети приведен на рисунке 2. Предполагается, что выделено три базовые сети, принадлежащие разным Операторам связи. Первый компонент, в свою очередь, включает три элемента, определяющие иерархические уровни базовой сети одного из Операторов связи. Первый, второй и четвертый компоненты, показанные на предыдущей иллюстрации, на рисунке 2 не представлены. Такой подход позволяет не загромождать модель. Предложенная детализированная модель лучше всего подходит к телефонной сети общего пользования, что подчеркивают названия элементов в границах первого компонента.



Рисунок 2. Детализация модели телекоммуникационной сети

По мере развития сети Интернет стала популярна трехуровневая модель, изображенная на рисунке 3. Считается, что впервые она была использована специалистами компании Cisco Systems. Обычно эту модель рисуют в виде плоскостей, расположенных по вертикали. Для сохранения общности с предыдущими иллюстрациями трехуровневая модель представлена посредством компонентов, соединенных последовательно. Над всеми компонентами указаны их названия на английском языке.



Рисунок 3. Трехуровневая модель телекоммуникационной сети

Некоторые современные технологии также требуют уточнения модели, изображенной на рисунке 1. В частности, такая необходимость свойственна системам сотовой связи вне зависимости от стандарта, используемого для их создания. Они, строго говоря, не являются сетями связи, так как образуют только ряд элементов в составе рассматриваемой модели. Эти элементы нужны для поддержки функций мобильности терминала. Актуальность уточнения модели, помимо целесообразности учета специфики связи с подвижными объектами, обусловлена и рядом других аспектов, среди которых уместно выделить следующие три обстоятельства:

* широкое использование облачных (cloud), туманных (fog) и капельных (dew) вычислений [7] для поддержки ряда важных услуг;
* растущая численность терминалов Интернета вещей [8], формально размещаемых в компоненте "Сеть в помещении пользователя", хотя места их расположения могут включать также подводное, подземное и воздушное пространство;
* продолжающийся процесс перехода к инфокоммуникационным системам [9] за счет конвергенции телекоммуникационных и информационных технологий.

Попытка учесть новые тенденции в телекоммуникационных сетях и в информационных системах приводит к нескольким моделям, среди которых уместно выбрать одну, отличающуюся простотой и способностью учитывать ожидаемые инновационные решения. Разумным выходом представляется переход к модели инфокоммуникационной системы, показанной на рисунке 4. Словосочетание "инфокоммуникационная система" – термин, используемый преимущественно в отечественной научно-технической литературе [9]. Он может рассматриваться как аналог выражения "information and communication technology" [10] в английском языке. Правда, ранее в англоязычной технической литературе не столь редко встречалось словосочетание "infocommunication system".



Рисунок 4. Модель инфокоммуникационной системы

Первый (слева) компонент в нижней части рассматриваемой модели назван "Сетью пользователя". В отличие от названия, которое использовано на рисунке 1, убраны слова "в помещении". Это сделано по той причине, что терминалы Интернета вещей и сотовой связи могут размещаться не только в помещении пользователя в отличие от традиционных телефонных аппаратов фиксированной связи.

Сеть доступа, как компонент модели телекоммуникационной сети, выполняет те же функции, что и прежде. Правда, принципы реализации сети доступа и используемые технические средства заметно отличаются от тех, которые применялись в эпоху доминирования телефонии [11]. Тем не менее, назначение сети доступа, рассматриваемой как "черный ящик" [12], не изменилось. Данное утверждение не будет корректным при анализе функциональности и технологической основы этого "черного ящика".

Сеть агрегации, по границам территории своего размещения, более всего похожа на местную (городскую или сельскую) телефонную сеть. Современная нормативная база уделяет особое внимание связи в границах муниципальных образований. По этой причине выделение сети агрегации в отдельный компонент модели представляется логичным решением. В предыдущих моделях сеть агрегации обычно рассматривалась как составная часть базовой сети.

Границы базовой сети сужаются (если такая формулировка уместна для компонента инфокоммуникационной системы, охватывающего всю планету). Она представляет собой совокупность множества междугородных и ряда международных сетей. Не исключено, что для большей части мегаполисов в состав базовой сети будет уместно включать также и крупные УК.

Средства поддержки инфокоммуникационных услуг связаны со всеми основными компонентами модели. Такое решение обусловлено актуальностью применения облачных, туманных и капельных вычислений, а также требованиями, формируемыми Интернетом вещей.

Таким образом, инфокоммуникационная система включает пять основных компонентов. Безусловно, они будут детализироваться при решении ряда задач по планированию сети. С другой стороны, не исключены решения, когда модель будет укрупняться. Такой подход возможен, например, при анализе инфокоммуникационной системы как многофазной системы массового обслуживания с целью расчета пропускной способности и производительности линейных сооружений и аппаратно-программных средств соответственно.

**Задачи выбора структуры телекоммуникационной сети**

Основным аспектам выбора структуры телекоммуникационной сети посвящен ряд публикаций, примерами которых служат результаты исследований, выполненных отечественными учеными [13, 14, 15]. Выбор структуры сети телекоммуникационной сети обычно рассматривается как результат решения оптимизационных задач [15, 16]. Такой подход полностью соответствует теории сетей связи. При этом следует помнить, что оптимизационная задача решается для математической модели [2], которая всегда отличается от исследуемого объекта или процесса. По этой причине даже корректно решенная оптимизационная задача может привести к выбору не самой лучшей структуры телекоммуникационной сети.

Вторая причина заключается в том, что оптимальные решения в моменты времени *t1* и *t2*, как правило, будут различаться между собой. На практике период между введением нового УК в состав телекоммуникационной сети, величина (*t2* – *t1*), обычно измерялся годами, реже – месяцами. Следовательно, проектные решения, принятые ранее, пересмотреть на практике нельзя. Пример такой ситуации для гипотетического города показан на рисунке 5, который состоит из двух фрагментов.



Рисунок 5. Задача выбора места для размещения узла коммутации

Левый фрагмент соответствует начальному этапу создания телекоммуникационной сети, когда в момент времени *t1* устанавливается единственный УК. Одно из первых решений такой задачи приведено в [13]. Ее иногда называют задачей Раппа – по фамилии автора полученных результатов. Место оптимального размещения первого УК обозначено координатами [*x1* (*t1*), *y1* (*t1*)]. На правом фрагменте рисунка 5 указаны координаты [*x1* (*t2*), *y1* (*t2*)] и [*x2* (*t2*), *y2* (*t2*)], которые определяют места оптимального размещения двух УК. Предполагается, что решение оптимизационной задачи к моменту *t2* привело к необходимости установки двух УК.

Пунктирной и штрихпунктирной линией показаны границы территории, в пределах которой находятся пользователи телекоммуникационной сети, в моменты времени *t1* и *t2* соответственно. Изменения границ территории определяются внешними (по отношению к системе связи) факторами, прогнозировать которые с необходимой точностью очень сложно. С учетом ряда дополнительных факторов другой природы различие в решениях в моменты времени *t1* и *t2*, а общем случае – *ti* и *tj*, становится закономерным.

Перенести первый установленный УК в новое здание не представляется возможным из-за экономических и организационных причин. Таким образом, после момента времени *t2* структура телекоммуникационной сети никогда не будет оптимальной. Если воспользоваться понятиями "Greenfield" и "Brownfield" [17] для постановки и решения рассматриваемой задачи, то можно сформулировать следующие пять положений:

* оптимизационная задача может быть с высокой точностью решена для условий вида "Greenfield", которое соответствует построению новой телекоммуникационной сети в границах территории, где нет ни инфраструктуры (зданий для установки оборудования УК и кабельной канализации), ни уже эксплуатируемых технических средств;
* необходимость решения оптимизационной задачи для условий вида "Greenfield" в настоящее время и в обозримой перспективе возникает крайне редко;
* основная часть оптимизационных задач должна решаться для условий вида "Brownfield", когда уже создана основная часть инфраструктуры и длительный период времени эксплуатируется комплекс технических средств электросвязи;
* решение оптимизационной задачи (а иногда – даже ее постановка) для условий вида "Brownfield" связано с рядом сложных моментов;
* целесообразно разработать методологический подход для постановки и решения оптимизационной задачи применительно к условиям вида "Brownfield" с учетом меняющихся требований к модернизируемой инфокоммуникационной системе.

Для условий вида "Brownfield" следует учитывать ряд дополнительных факторов, которые обусловлены различием между рекомендованными и реализованными решениями. Такие различия объясняются объективными и субъективными причинами. Объективные причины обусловлены, например, такими обстоятельствами:

* при разработке концептуальных положений модернизации телекоммуникационной сети и последовавшим за ней проектированием не были учтены особенности, которые связаны с изменившимися принципами застройки территории города или сельского поселения;
* в процессе проведения работ над проектом сократился объем финансирования, что привело к пересмотру рекомендуемых решений.

Субъективные причины обычно связаны с желанием использовать апробированные ранее решения, не обращая внимания на тот факт, что модернизация телекоммуникационной сети осуществляется за счет качественно новых аппаратно-программных средств и линейных сооружений. В некоторых случаях в проектной документации обнаруживаются ошибки, которые предполагается исправить самостоятельно в процессе проведения строительно-монтажных работ.

Один из примеров изменения проектных решений приведен на рисунке 6. В левой части иллюстрации показана структура транспортной (первичной) сети, построенной в виде кольца [5, 18]. Эта структура представлена графом с вершинами *ai* и ребрами *bij*. В правой части рисунка 6 изображена структура реализованной транспортной сети, которая отличается тем, вершины *a1* и *a4* связаны с двумя смежными вершинами через точки *g1* и *g4* соответственно. В результате значения коэффициента готовности [19] для вершин *a1* и *a4* снижаются. Это обусловлено формированием так называемых "плоских колец" [5, 18] на участках *a1* – *g1* и *a4* – *g4*.



Рисунок 6. Изменение структуры транспортной сети при ее построении

Иными словами, надежность транспортной сети уменьшается. Это приводит к снижению показателей надежности инфокоммуникационной системы в целом. Причем первый отказ, приводящий к изоляции вершины *a1* или *a4*, может возникнуть через несколько лет после реализации структуры транспортной сети, показанной в правой части рисунка 6. К этому времени эксплуатационный персонал может уже забыть об изменении рекомендованных проектных решений.

Постановка и решение задач для условий вида "Brownfield" не усложняет комплексную процедуру планирования телекоммуникационной сети. Одно из полноценных представлений об этой процедуре предложено МСЭ в справочном руководстве Бюро развития электросвязи [20]. В этом справочном руководстве предлагается выделять три основных блока, включающих, в свою очередь, набор самостоятельных или взаимоувязанных направлений работы:

* бизнес-блок;
* технический блок;
* эксплуатационный блок.

Процедура планирования телекоммуникационной сети, предложенная МСЭ, приведена на рисунке 7. В составе каждого блока перечислено по шесть направлений необходимых работ. Пунктирные стрелки в верхней части иллюстрации подчеркивают тот факт, что все процессы планирования осуществляются последовательно. Такие же стрелки внизу свидетельствуют о наличии обратной связи между всеми тремя блоками.



Рисунок 7. Процедура планирования телекоммуникационной сети, предложенная МСЭ

Справочное руководство [20] датировано 2008 годом, но остается актуальным даже с учетом эволюции принципов развития инфокоммуникационной системы в целом и появления новых технологий различного рода. Ниже преимущественно рассматриваются задачи, прямо или косвенно относящиеся к первому, третьему и пятому направлениям в составе технического блока. Такой выбор объясняется целью данной работы и не умаляет актуальности других направлений во всех трех блоках. В этом разделе, согласно его названию, основной акцент сделан на первом направлении – "Структура сети".

Строго говоря, игнорировать направление "Затраты" из состава "Бизнес-блока" нельзя. Обычно в проектах по развитию инфокоммуникационной системы ставится цель минимизации капитальных затрат [3, 4]. Правда, эту цель иногда можно достигнуть без оценки затрат в денежных единицах. В частности, могут быть эффективно использованы не выражаемые ни в одной валюте денежные единицы, называемые в англоязычной технической литературе "monetary units" [21]. Этот же термин используется экономистами, но имеет другой смысл. Вычисление значений денежных единиц позволяет найти предпочтительный вариант, но не дает оценку капитальных затрат. Например, в [21] приведен такой набор для стоимости линейных трактов цифровых систем передачи разной скорости при длине в один километр:

* 6 Мбит/с – 1 денежная единица;
* 45 Мбит/с – 4 денежных единицы;
* 150 Мбит/с – 9 денежных единиц.

Отношения скоростей образуют такой ряд: 1,0 – 7,5 – 25,0. Цены, выраженные в денежных единицах (monetary units), формируют ряд следующего вида: 1,0 – 4,0 – 9,0. Если необходимо построить линейный тракт со скоростью 30 Мбит/с, то целесообразно выбрать ту систему передачи, которая обеспечивает скорость обмена данными в 45 Мбит/с. Применение пяти систем, каждая из которых поддерживает скорость обмена информацией в 6 Мбит/с, обойдется дороже. Уверенно делая вывод об эффективности применения оборудования, работающего на скорости 45 Мбит/с, проектный институт может не знать о реальной стоимости технических средств. По этой причине метод, основанный на расчете денежных единиц, можно считать весьма эффективным на этапе предварительного анализа возможных решений.

В качестве объекта исследования выбран гипотетический город, для которого пунктирной и штрихпунктирной линиями показаны границы существующей и планируемой застройки соответственно – рисунок 8. Величины площади территорий обозначены как *SI* и *SII*. На территории площадью *SI* показаны площадки размещения семи сетевых узлов (СУ) транспортной сети, которые обеспечивают трактами обмена информацией эксплуатируемые УК, и трассы проложенной кабельной канализации. Иными словами предложенная модель в границах, обозначенных пунктирной линией, отражает состояние инфраструктуры. Нумерация СУ определяется очередностью их создания.



Рисунок 8. Модель объекта исследования: существующая инфраструктура

Трассы существующей кабельной канализации не определяют принципы связи между УК. За счет использования полупостоянной коммутации [5] в оборудовании СУ может быть сформирована любая структура связи между УК. Предположим, что для рассматриваемого гипотетического города используется принцип связи между УК, именуемый "каждый с каждым" [14]. Тогда моделью коммутируемой (вторичной) сети будет служить полносвязный граф [22], изображенный на рисунке 9. Номера вершин *ai* и соответствующих СУ совпадают.



Рисунок 9. Структура коммутируемой сети на территории с площадью *SI*

Обычно полносвязный граф ассоциируется с высокой надежностью того объекта, чьей моделью он служит. На самом деле оценку показателей надежности следует проводить для модели, отображающей структуру транспортной сети, которая была представлена на рисунке 8. Соответствующий граф показан на рисунке 10. Для каждой вершины графа в квадратных скобках указана ее степень [22]; она равна количеству инцидентных ребер. Степень вершин *a6* и *a7* равна единице, что свидетельствует о весьма низкой надежности транспортной сети, а, следовательно, и инфокоммуникационной системы в целом.



Рисунок 10. Структура транспортной сети на территории с площадью *SI*

В процессе модернизации телекоммуникационной сети необходимо увеличить степень вершин *a6* и *a7*, что – с практической точки зрения – означает построить для СУ6 и СУ7 две новые трассы кабельной канализации. Соответствующие проектные работы целесообразно совместить с задачей выбора трасс кабельной канализации для подключения нового СУ8, который показан в нижней части рисунка 8.

Тот факт, что места размещения СУ и созданные ранее трассы кабельной канализации не меняются, позволяет решить поставленную задачу перебором возможных вариантов. Два таких варианта, обозначенные как (а) и (б), показаны на рисунке 11. Строительство трасс кабельной канализации может быть разнесено во времени. Это означает, что рассматриваемые варианты иллюстрируют структуру транспортной сети к моменту завершения плана ее модернизации.



Рисунок 11. Структура транспортной сети на территории с площадью *SII*

Вариант (а) предполагает строительство двух новых трасс. В случае его реализации степень вершин *a6*, *a7* и *a8* становится равной двум. Стоимость трассы кабельной канализации на участке между СУ6 и СУ8 может оказаться весьма существенной. По этой причине более эффективным, с точки зрения минимизации капитальных затрат, может оказаться вариант (б). Он основан на строительстве трех трасс, каждая из которых выглядит сравнительно короткой. При его реализации степень вершин *a3* и *a5* возрастет на единицу, что повысит надежность транспортной сети.

Если не учитывать положительный эффект от повышения степень вершин *a3* и *a5* (он, безусловно, должен быть оценен в процессе проведения дальнейших исследований), то сравнивать варианты (а) и (б) можно по величинам капитальных затрат, необходимых для осуществления соответствующих проектов – *Ка* и *Кб*. Такой подход допустим при равенстве величин эксплуатационных расходов и идентичности поведения кривых *NPV* (net present value) – приведенной текущей стоимости [23]. Желательно также, чтобы оба рассматриваемые варианта были идентичны с точки зрения возникающих рисков [24]. Тогда выбор лучшего варианта модернизации транспортной сети определяется по минимальному значению требуемых капитальных затрат.

Оба варианта модернизации транспортной сети позволяют реализовать полноценную кольцевую структуру, обеспечивающую высокие показатели надежности. Принято считать, что практическое применение кольцевых топологий началось вместе с внедрением цифровых систем передачи синхронной иерархии [25]. На самом деле задолго до появления этого поколения систем передачи специалистами ЦНИИС было предложено использовать кольцевые структуры для развития системы связи в сельской местности [26]. Разработанное оборудование было успешно испытано в Одесской области более тридцати лет назад.

В настоящее время Операторы связи стали использовать еще одну структуру транспортной сети, обладающую высокой надежностью. Она получила название "двойная звезда". Данное решение также было предложено отечественными специалистами. В 1986 году сотрудниками ЛОНИИС была опубликована статья [27], в которой анализировалась структура класса "двойная звезда". Ее также можно реализовать для обоих вариантов модернизации транспортной сети, рассмотренных выше.

**Задачи выбора количества узлов коммутации**

История развития телекоммуникационных сетей, поддерживающих услуги диалога, началась с телефонной связи. По этой причине каждый СУ создавался для предоставления транспортных ресурсов, необходимых, в первую очередь, автоматической телефонной станции (АТС). В городах здания, предназначенные для размещения оборудования телефонной связи, обычно использовались для установки двух или трех АТС. С точки зрения рассматриваемой задачи можно считать, что эти АТС представляют собой один УК.

При постановке задач по выбору количества УК в перспективной инфокоммуникационной системе следует учитывать, как минимум, три обстоятельства. Во-первых, концепция сети связи следующего поколения [28] и ее модификации [29] вряд ли будут реализованы в том виде, в котором они сформулированы в рекомендациях МСЭ или в документах других международных организаций. Во-вторых, даже при условии, что международное сообщество примет решение о реализации единой мультисервисной сети, обеспечивающей все виды инфокоммуникационных услуг, в течение нескольких десятилетий будут сосуществовать УК разных типов. В-третьих, появление новых идей и технологий может радикально изменить основные принципы дальнейшего развития инфокоммуникационной системы, что актуализирует применение сценарного подхода [30] для анализа ключевых направлений модернизации транспортной сети.

Логика развития инфокоммуникационной системы, включая современные концепции сетей связи с подвижными объектами 5G [31] и 6G [32], позволяет предположить, что в течение, как минимум, десяти-пятнадцати лет в отрасли не произойдет явление вида "Черный лебедь" [33]. При этом существенное изменение некоторых процессов, классифицируемых при помощи модели "окна Овертона" [34], остается вполне возможным. В частности, не исключены качественные изменения трафика Интернета вещей [35].

При переходе к цифровым технологиям заметно возросла величина емкости УК, при которой капитальные затраты на модернизацию инфокоммуникационной системы становились минимальными, а также сокращались расходы на обновление версий программного обеспечения [5]. По этой причине средняя емкость центров коммутации в сотовых сетях, они более известны по англоязычной аббревиатуре MSC (mobile switching centre), существенно превышала аналогичную величину для АТС. Даже при большей численности абонентов сотовых сетей, количество используемых MSC меньше, чем численность АТС.

Те виды MSC, которые использовались в первых поколениях сотовых сетей, и АТС были построены на технологии "коммутация каналов". Однако это были разные виды оборудования, хотя в самом начале создания концепции сотовой сети рассматривался вариант применения единого коммутационного оборудования для фиксированной и мобильной связи. На рисунке 12 изображены две плоскости коммутируемых (вторичных) сетей, в которых используется разное количество УК. При этом предусмотрено взаимодействие УК из разных плоскостей.



Рисунок 12. Две плоскости коммутируемых (вторичных сетей)

Задачи выбора количества УК для новой сети (в частности, поддерживающей стандарты 5G и 6G) могут быть сформулированы следующим образом:

1. Определить количество необходимых УК к моменту *tS*, который соответствует насыщению рынка – *N*(*tS*);
2. Выбрать те площадки (места размещения СУ), на которых целесообразно установить оборудование УК – множество {*L*(*N*)};
3. Разработать прогноз роста трафика – *Y*(*t*), позволяющего выбрать стратегии введения всех УК и наращивания их производительности.

Практически все три задачи связаны с перечисленными выше проблемами выбора структурных характеристик. По этой причине их следует решать совместно. Более того, данные задачи уместно решать с учетом результатов оценки пропускной способности транспортных ресурсов, а также производительности средств коммутации и обработки информации. Подобное решение подтверждает объединение данных задач в единый технический блок, показанный на рисунке 7. Следовательно, необходимо поставить задачи по оценке пропускной способности транспортных ресурсов, а также производительности средств коммутации и обработки информации, которые в свою очередь подразумевают разработку прогноза изменений мультисервисного трафика.

**Прогноз мультисервисного трафика**

Мультисервисный трафик, в отличие от хорошо изученной нагрузки в сетях телефонной связи, плохо предсказуем. Данное утверждение справедливо для двух важных процессов:

* колебание мультисервисного трафика за сутки или меньший отрезок времени (например, в час наибольшей нагрузки);
* изменение мультисервисного трафика в течение нескольких лет и даже десятилетий.

Для прогнозирования величины мультисервисного трафика могут быть использованы известные экономико-математические методы [36, 37]. Правда, эти методы не всегда позволяют получить достоверные оценки по ряду причин, среди которых следует выделить специфику роста скорости обмена данными. На рисунке 13 воспроизведен приведенный в [38] график, иллюстрирующий динамику потенциальной скорости обмена данными для сети доступа (*B*) за двадцать лет (*t*). Для оси ординат использован логарифмический масштаб, что свидетельствует об экспоненциальном характере функции *B*(*t*).



Рисунок 13. Рост скорости обмена данными для сети доступа

У многих специалистов возникает резонный вопрос: "Нужна ли существенной части пользователей скорость обмена данными в диапазоне от 1 до 10 Гбит/с?". Более того, даже обоснованный спрос на скорость обмена данными свыше 100 Мбит/с также представляется сомнительным за исключением незначительной группы потенциальных пользователей квартирного сектора. В состав квартирного сектора входят также клиенты Оператора связи, проживающие в индивидуальных домах. Тем не менее, многие Поставщики услуг Интернет анонсируют планы по обеспечению скорости доступа в диапазоне от 1 до 10 Гбит/с в ближайшее время. Убедительные обоснования о необходимости подобных решений в научно-технической литературе не приводятся.

Можно предложить, как минимум, две гипотезы, объясняющие тенденцию постоянного повышения предлагаемой скорости в сети доступа. Первое предположение связано с понятным желанием ряда участников инфокоммуникационного рынка сформировать "ненасытного потребителя" [39]. Второе объяснение рассматриваемого явления заключается в предвидении реального платежеспособного спроса – в ближайшей или в отдаленной перспективе – на высокие скорости обмена данными. В частности, если Интернет вещей будет передавать в большом объеме видеоинформацию [35], то дальнейший рост скорости на уровне сетей доступа продолжится. Более того, может наступить момент, когда скорость передачи информации в сеть (uplink) превысит аналогичную величину в сторону терминального оборудования пользователя (downlink). Впрочем, обе гипотезы вполне совместимы и могут "работать" одновременно.

Как же в этих условиях прогнозировать трафик? По всей видимости, следует пересмотреть формулировку поставленной задачи, акцентируя внимание на уже упомянутом выше сценарном подходе [30]. В данном случае его применение основано на такой последовательности операций:

1. определяются минимальные требования, соответствующие характеристикам трафика (например, объему обслуживаемых данных *Vmin*(*t*) в период наибольшей нагрузки – ПНН);
2. прогнозируются максимальные требования, ожидаемые для характеристик трафика к концу рассматриваемого периода *T* (пусть примером также служит объем обслуживаемых данных *Vmax*(*t*) в ПНН);
3. оцениваются при помощи модели "Окна Овертона" [34, 35] "немыслимые" (*unthinkable*) требования к характеристикам трафика (в качестве примера также фигурирует объем обслуживаемых данных *Vunt*(*t*) в ПНН);
4. разрабатываются и тщательно анализируются практически значимые сценарии перехода от (a) к (b);
5. формулируются и рассматриваются маловероятные (определяемые в [34] как "немыслимые") сценарии перехода от (a) и (b) к (c).

Значения *Vmin*(*t*) можно получить из условия, что трафик будет расти медленно. Для некоторых оценок можно считать, что процесс *Vmin*(*t*) вошел в фазу "насыщения", то есть для *t* > 0 рассматриваемая функция остается неизменной. Для построения кривой *Vmax*(*t*) достаточно выбрать самый "смелый" прогноз из опубликованных результатов в научно-технической литературе. В качестве базы для оценок функции *Vunt*(*t*) уместно использовать экстраполяцию экспоненциальной зависимости, изображенной на рисунке 13, если нет иных данных, основанных на гипотезах, которые внушают доверие.

Простой пример, иллюстрирующий предлагаемый методологический подход, показан на рисунке 14. Считается, что момент времени *t* = 0 соответствует началу разработки прогностических оценок. Основная задача заключается в получении данных к моменту времени *x*3. При этом интересна также информация, относящаяся к моменту времени *x*1. Для него и для *t* = *x*2 в перспективе станут известны достоверные оценки функции *V*(*t*).



Рисунок 14. Три исследуемые прогностические кривые

Значения *l*1, *l*2 и *l*3 определяют величины отклонений достоверной оценки *V*(*x*2) от трех значений исследуемых прогностических кривых к моменту времени *x*1. Способы получения численных значений для таких отклонений приведены, например, в [40]. Величины подобных отклонений позволяют сделать вывод относительно корректности трех прогнозов, но это не означает, что на перспективу следует выбрать только одну из трех рассматриваемых функций. Данное утверждение основано на том, что ситуация для отрезка времени [*x*2, *x*3] может поменяться вследствие плохо предсказуемых причин. Вместо выбора одной из прогностических кривых следует провести тщательный анализ всех возможных сценариев.

Величина объема обслуживаемых данных, выражаемая, например, значением скорости обмена IP-пакетами, представляет собой только одну характеристику мультисервисного трафика. Практический интерес связан также с тенденциями различия скоростей в направлениях uplink и downlink, с поведением производных от функции *V*(*t*), а также с рядом других атрибутов. Они также служат предметом изучения при анализе возможных сценариев. Следует учесть, что сценарный подход подразумевает исследование ряда объектов и процессов, которые напрямую могут быть не связаны с природой мультисервисного трафика. Эти объекты и процессы иногда требуют проведения междисциплинарных исследований. Характерным примером подобных процессов служит изменение свойств обслуживаемого трафика, который типичен для чрезвычайных ситуаций [41].

**Анализ сценариев изменения характеристик трафика**

Задача анализа возможных сценариев может быть сведена к поиску таких решений, которые позволяют модернизировать инфокоммуникационную систему без необходимости ее радикальных изменений. Данное положение уместно проиллюстрировать при помощи трех графиков, приведенных на рисунке 15. Предполагается, что в качестве долгосрочного прогноза выбран отрезок времени (0, *x*3); такие обозначения были использованы на предыдущем рисунке. Величины *Vmin*(*x*3), *Vmax*(*x*3) и *Vunt*(*x*3) определяют прогнозируемые значения пропускной способности транспортных ресурсов к моменту времени *x*3. Эти значения заданы величинами математического ожидания *E*[*Vmin*(*x*3)], *E*[*Vmax*(*x*3)] и *E*[*Vunt*(*x*3)], а также интервалами, определяющими размах трех рассматриваемых функций. Интервалы, без потери общности, считаются симметричными относительно величин моды распределений, которые совпадают со значениями математического ожидания.



Рисунок 15. Три прогностические оценки для долгосрочного прогноза

Логично предположить, что размах исследуемых функций будет разным. По всей видимости, он будет самым существенным для функции *Vunt*(*t*). Вид распределений, для которых заданы величины размаха, не представляется существенным с практической точки зрения.

На рисунке 15 показаны два значения пропускной способности – *G*1 и *G*2. Они определяют наиболее вероятные границы пропускной способности транспортных ресурсов к моменту времени *x*3. Далее предполагается, что длины отрезка (0, *x*3) меньше величины жизненного цикла [42] используемых транспортных ресурсов, что соответствует практическим условиям. Следовательно, на этапе разработки проектных решений следует предусмотреть возможность формирования требований к необходимой пропускной способности для момента времени *x*3 в интервале (*G*1, *G*2).

Такая возможность возникает при выборе комплекса технических средств (в основном, линейно-кабельных сооружений, а также оборудования передачи, коммутации и обработки информации), способного наращивать ресурсы для обеспечения сформулированных требований без существенных инвестиций. Примером такого решения служит проект, который включает простейшую операцию – замену тракта обмена информацией между двумя УК. Пусть заменяемый тракт обмена информацией был создан путем уплотнения кабеля с двумя оптическими волокнами системой передачи SDH [18] с пропускной способностью порядка 155 Мбит/с. Предположим, что величины *G*1 и *G*2 заданы такими значениями: 2 Гбит/с и 900 Гбит/с. Допустим, что использование упомянутого выше подхода "monetary units" [21] позволило выбрать такое решение:

* целесообразно проложить новый кабель с восемью оптическими волокнами (шесть основных и два резервных) в созданной ранее канализации;
* используя шесть оптических волокон, формируется тракт обмена информацией на уровне порядка 4 Гбит/с;
* оборудование, выбранное для передачи информации по оптическим волокнам, позволяет наращивать – по мере необходимости – свою пропускную способность до 1 Тбит/с (используя, например, оборудование компактного спектрального уплотнения – DWDM и/или другие решения).

Таким образом, задача анализа сценариев, связанных с изменением характеристик трафика, трансформируется. Она сводится не к выбору одной из альтернатив, а к разработке решения, которое с минимальными инвестициями адаптируется к возникающим проблемам. При этом немыслимый сценарий обретает практический смысл. Рост трафика, типичный для такого сценария, аналогичен процессу повышения нагрузки в условиях чрезвычайных ситуаций. Алгоритмы ограничения трафика при возникновении чрезвычайных ситуаций [43] будут востребованы при реализации немыслимого сценария до проведения мероприятий по повышению пропускной способности транспортных ресурсов.

Тем не менее, анализ возможных сценариев имеет практический смысл для разработки ряда прогнозов. В частности, сведения, публикуемые компанией TeleGeography (<https://www2.telegeography.com/>), позволяют сделать вывод о постепенном переходе к симметричному доступу с точки зрения скоростей обмена данными в направлениях uplink и downlink. Если подтвердится сформулированная в [35] гипотеза о широком использовании видеоинформации в терминальном оборудовании Интернета вещей, то может оказаться, что скорость передачи данных в направлении uplink станет больше, чем аналогичная величина для направления downlink. Результаты такого прогноза весьма важны для разработки некоторых видов инфокоммуникационного оборудования.

Представляются важными прогнозы, касающиеся степени риска каждого из возможных сценариев [24, 44]. В первую очередь, практический интерес представляют потенциальные финансовые риски. К ним относятся и риски, обусловленные возможным переходом к новым принципам построения инфраструктурных сооружений [45], которые будут создаваться для сложных сетей и систем разного назначения.

К сожалению, практический анализ возможных сценариев нельзя провести за счет использования исключительно экономико-математических методов. Ряд ограничений не так просто формализовать, что усложняет процесс принятия решений [46]. Тем более, что в обозримой перспективе в процессе принятия решений придется участвовать экспертам из разных областей знаний.

**Постановка ряда задач, имеющих практическую ценность**

В процессе модернизации инфокоммуникационной системы ставятся новые научные задачи, которым присуща практическая ценность. В данном разделе рассматриваются примеры трех задач подобного рода.

Одна из задач, возникающих в процессе развития телекоммуникационной сети, заключается в выборе принципов присоединения новых элементов. Чаще всего подобные задачи встречаются при модернизации сетей доступа при отсутствии инфраструктурных сооружений. Два варианта решения такой задачи показаны на рисунке 16. К кольцу транспортной сети, фрагмент которого представлен тремя вершинами графа *a*12, *a*13 и *a*14, необходимо подключить два новых элемента. Их моделями служат вершины *a*01 и *a*02.



Рисунок 16. Подключение двух новых элементов к созданному ранее кольцу

В левой части рисунка 16 изображен вариант, предусматривающий построение нового (дополнительного) кольца, которое объединяет четыре вершины: *a*12, *a*02, *a*01 и *a*14. Правый фрагмент этого же рисунка иллюстрирует другую возможность: создаются два новых кольца, каждое из которых проходит через три вершины. На практике такие задачи можно решить полным перебором всех возможных вариантов [47], называемым также методом "грубой силы" – от англоязычного словосочетания "brute force". Лучшим решением, при условии, что соблюдены все ограничения технического характера, следует считать ту структуру, для реализации которой требуются минимальные инвестиции.

Следует отметить, что перебор возможных вариантов позволяет найти оптимальное решение для развития локального фрагмента транспортной сети. Подобный подход не позволяет найти оптимальную структуру для инфокоммуникационной системы в целом.

Рассмотренная задача связана с изменениями, затрагивающими небольшой фрагмент инфокоммуникационной системы. В некоторых случаях возникает необходимость или же возможность изменения структуры для фрагмента более существенного масштаба. В частности, при смене технологий обмена информацией на уровне сети доступа иногда пересматриваются принятые ранее топологические решения.

К транспортной сети, как к общему компоненту, от которого зависит устойчивость функционирования инфокоммуникационной системы в целом, предъявляются жесткие требования к коэффициенту готовности и времени устранения отказов. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке проектных решений.

Структуры транспортных сетей уже сложились почти на всех уровнях иерархии инфокоммуникационной системы. Исключением обычно служит сеть доступа, построенная за счет прокладки многопарных кабелей с медными проводниками [48]. На верхних уровнях иерархии транспортных сетей, как правило, используются кольцевые топологии [25] – левый фрагмент рисунка 17. Между вершинами *a*12 и *a*16 показана хорда, позволяющая повысить надежность транспортной сети [5]. Во многих проектах создание хорд не предусматривается.



Рисунок 17. Две структуры транспортной сети: "Кольцо" и "Двойная звезда"

Каждому из двух вариантов построения структуры транспортной сети присущи свои достоинства и недостатки [5]. Исторически сложилось так, что транспортные сети при использовании кабелей с оптическими волокнами преимущественно строились на базе кольцевых топологий. Топология вида "Двойная звезда" в последние годы нашла применение для создания сетей высокоскоростного доступа (их часто называют широкополосными).

Интересно сравнить коэффициенты готовности для обеих структур – *KГ*(а) и *KГ*(б) для некоторой пары УК. Пусть ими будут вершины *a*12 и *a*18. Предположим, что все УК (вершины графа) абсолютно надежны. Величины вероятности отказа всех трактов обмена данными (ребра графа), обозначенные ниже как *q*, полагаются идентичными. Для структуры "Двойная звезда" выражение для расчета коэффициента готовности приведено, например, в [49]:

 (1)

Используя правила теории надежности [19], несложно вывести соотношения для оценки *KГ*(а). Для его компактной записи уместно ввести переменную *r* = 1 – *q*. Величина *r* определяет вероятность безотказной работы тракта обмена данными. Тогда формула для расчета *KГ*(а) может быть представлена в такой форме:

 (2)

Несколько значений *KГ*(а) и *KГ*(б) при разных величинах параметра *q* приведены в таблице 1.

Табл. 1. Значения *KГ*(а) и *KГ*(б) для исследуемых структур транспортной сети

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметр *q* | Значение *KГ*(а) | Значение *KГ*(б) |
| 0,1 | 0,91097379 | 0,97848000 |
| 0,01 | 0,99883545 | 0,99979805 |
| 0,001 | 0,99998804 | 0,99999800 |
| 0,0001 | 0,99999988 | 0,99999998 |

Численные значения коэффициентов готовности *KГ*(а) и *KГ*(б) позволяют сделать вывод о том, что структура "Двойная звезда" обладает лучшими показателями структурной надежности. Различия в оценках *KГ*(а) и *KГ*(б) будут более ощутимыми для колец с большим количеством УК. Кроме того, если величины коэффициентов готовности для УК будут не столь близки к единице, то преимущества структуры "Двойная звезда" (с точки зрения надежности) станут более весомыми.

Третья задача связана с пересмотром структуры коммутируемой (вторичной) сети. При этом топология транспортной (первичной) сети будет оставаться неизменной или модифицироваться не столь существенно. Рассматриваемый ниже пример основан на проекте модернизации цифровой городской телефонной сети (ГТС), о котором на одной международной конференции рассказали специалисты из Амстердама. Были ли реализованы предлагаемые решения? Достоверных сведений в научно-технической литературе не приводилось, но идея проекта представляется весьма интересной. При разработке проекта были приняты во внимание три тенденции, прямо либо косвенно относящиеся к сфере инфокоммуникационных систем:

Во-первых, на базе цифровой ГТС, построенной в столице Нидерландов, было необходимо создать условия для формирования сети следующего поколения в соответствии с концепцией NGN (Next Generation Network) – сети следующего поколения [28]. Для этого было необходимо найти источник инвестиций в размере немногим менее одного миллиарда евро.

Во-вторых, миниатюризация телекоммуникационного оборудования позволила освободить значительную площадь в тех зданиях, которые были построены для размещения электромеханических коммутационных станций. Они занимали весьма большую площадь. Появилась реальная возможность использовать выносные концентраторы, позволяющие экономично модернизировать сети доступа, обеспечивая потенциальную возможность для повышения скорости доступа в Интернет.

В-третьих, стала устойчиво расти стоимость зданий (более точно – земли, на которой они были построены) в центральной части города. Значительная часть зданий, в которых размещались коммутационные станции, существенно выросла в цене.

Учитывая эти обстоятельства, был разработан проект по изменению структуры коммутируемой сети. Модель цифровой ГТС показана в левой части рисунка 18. Она включает четыре УК. Для второго УК показаны три выносных модуля (ВМ), используемые для построения сети доступа. Территория сети доступа для второго УК выделена пунктирной линией.



Рисунок 18. Вынос оборудования УК на границы города

В правой части рисунка 18 изображена модель модернизированной коммутируемой сети. Предполагается, что количество УК остается неизменным. Все четыре новых УК выносятся ближе к границам городской черты, где стоимость зданий возрастает не столь существенно или даже не меняется. Для первого УК показаны границы сети доступа, в составе которой насчитывается пять ВМ. Для предложенной модели количество ВМ выбрано условно; решение задачи по оценке их оптимальной численности и мест размещения – предмет отдельного исследования.

Классические принципы оптимального построения ГТС [14] никак не "вяжутся" с моделью, показанной в правой части рисунка 18. Однако оценки авторов проекта показали, что средства, вырученные от продажи зданий в центральной части города, превышают миллиард евро. Это означает, что реализация проекта не потребует привлечение инвестиций. Более того, в результате перехода к NGN участники проекта сразу после продажи зданий получат дополнительный доход.

Конечно, размещение большого количества ВМ может потребовать существенных затрат для городов с широким диапазоном изменений температуры окружающей среды. Кроме того, важным фактором становится защита оборудования от вандалов, которая также может привести к заметному росту затрат Оператора связи. Следует отметить, что применение оборудования класса ВМ, при всей сложности возникающих проблем, стало обычной практикой ряда отечественных Операторов связи.

**Риски, присущие телекоммуникационным сетям и информационным системам**

Термин "риск" стал часто употребляться в научно-технической литературе [24, 44]. Этимология слова "риск" очень интересна; соответствующая информация хорошо представлена, например, в Википедии. Для телекоммуникационных сетей и, пожалуй, инфокоммуникационных систем в целом полезна образная трактовка, приведенная (среди прочих толкований) лингвистом Максом Фасмером: "Лавировать между скал". Это определение позволяет анализировать различные проявления риска при помощи кортежа [50] следующего вида:

 (3)

Обозначения *C* и *P* указывают на сочетание последствий наступления неблагоприятных событий и вероятности их возникновения. Подобное сочетание некоторыми авторами используется как определение термина "риск". Элемент кортежа *I* напрямую связан с инвестициями, которые необходимы для ликвидации последствий наступивших неблагоприятных событий либо на превентивные меры, позволяющие минимизировать риск или даже исключить его появление. Процесс "лавирования" заключается в выборе компромисса, связанного с величиной *I*, при различных видах пар "*C* ↔ *P*". Предлагаемый подход не следует считать единственным из всех возможных. Он позволяет проще других альтернатив ставить и решать задачи по планированию телекоммуникационных сетей.

Среди потенциальных видов риска в данном разделе акцентируется внимание на трех из них:

* проблема обслуживания мультисервисного трафика в нештатных ситуациях различной природы;
* возможное изменение парадигмы развития инфокоммуникационных систем под влиянием процессов цикличности;
* плохо предсказуемые требования "Индустрии 5.0" [51] к инфокоммуникационным системам.

Устойчивость функционирования инфокоммуникационной системы важна всегда, что часто подчеркивается при помощи известной формулы "24/7/365". Особенно важным аспектом функционирования инфокоммуникационной системы следует считать ее работу в условиях нештатных ситуаций. Их типичных примером служит чрезвычайная ситуация. Трафик в условиях чрезвычайных ситуаций резко возрастает [52], меняя при этом ряд своих важных свойств.

При отсутствии чрезвычайной ситуации трафик в телекоммуникационной сети порождается коммуникативными и информационными потребностями [53] пользователей. При возникновении чрезвычайной ситуации формируется дополнительный трафик, определяемый реакцией части пользователей на событие [54]. Изучение трафика, возникающего в условиях чрезвычайных ситуаций, показало его сходство с нагрузкой, формируемой при проведении ряда "Горячих линий" [55]. Обращение пользователей в период проведения "Горячей линии" также можно рассматривать как реакцию на событие, но планируемое заранее, а не произошедшее неожиданно в отличие от большей части чрезвычайных ситуаций.

Ухудшение характеристик, определяющих качество обслуживания трафика, в условиях нештатных ситуаций увеличивает риски, связанные с безопасностью жизни людей, с сохранением материальных ценностей и с обеспечением экологической безопасности. По этой причине становится актуальной превентивная подготовка инфокоммуникационной системы к эффективной работе в условиях нештатных ситуаций [41, 52]. Это достигается созданием резервных мобильных телекоммуникационных комплексов и применением алгоритмов, позволяющих приоритетно обслуживать трафик, который особо важен в условиях нештатных ситуаций с учетом их особенностей.

Некоторые виды риска порождаются цикличностью [56], которая свойственна процессам развития сложных систем. В таблице 2 приведены циклы развития для системы телефонной связи [57], которые схожи с длинными волнами Кондратьева [58]. Качественные изменения в системе телефонной связи происходили примерно через каждые сорок лет.

Табл. 2. Циклы развития системы телефонной связи

|  |  |
| --- | --- |
| Существенные этапы эволюции телефонии | Время |
| Появление телефонной связи | 80-е годы XIX века |
| Автоматизация сетей телефонной связи | 20-е годы XX века |
| Использование программного управления в АТС | 60-е годы XX века |
| Смена технологий передачи и коммутации | Начало XXI века |

Если сформулированная в [57] гипотеза окажется верна хотя бы в первой половине XXI века, то есть примерно к 2040 году, будет сформулирована качественно новая парадигма дальней эволюции инфокоммуникационной системы. Потенциальный риск может заключаться в том, что к реализации новых принципов модернизации эксплуатируемых технических средств некоторые участники инфокоммуникационного рынка будут не готовы. В первую очередь, могут возникнуть серьезные препятствия с необходимостью поиска существенных инвестиций. Нельзя, конечно, исключать риски, обусловленные технологическими факторами, подготовкой кадров и другими причинами.

Следует также учесть, что вероятные качественные изменения в основах инфокоммуникационной системы (после 2040 года) совпадают со временем, близким к точке технологической сингулярности [59]. Предполагается, что в этой точке (по всей видимости, на отрезке времени) технологическое развитие станет неуправляемым и необратимым. Ряд футурологов предполагает, что данный процесс существенно изменит жизнь людей. Важную роль в существовании цивилизации будет играть суперинтеллект в искусственной форме.

Не исключено, что процессы технологического обновления будут развиваться иначе. Здесь уместно вспомнить слова нашего выдающего соотечественника, Сергея Сергеевича Аверинцева, о фразе, которой ему хотелось закончить лекцию или статью: "А может быть, все было как раз наоборот". Если их обратить в будущее, то можно предложить такую формулировку: "А может быть, все будет не так". Это еще одна причина, по которой актуален сценарный подход, упомянутый выше.

Основные принципы перехода к "Индустрии 5.0" пока сформулированы в самом общем виде. Определить соответствующие требования к инфокоммуникационным системам для "Индустрии 5.0" также можно в самом общем виде. В чем-то подобная ситуация напоминает историю развития Интернета вещей. Его первоначальная концепция [8] не включала такие перспективные приложения как летающие сети [60], а также подводный [61] и подземный [62] Интернет вещей.

Можно с высокой долей уверенности полагать, что продолжатся тенденции, характерные для развития отраслей "Связь" и "Информатика":

* повышение спроса на уровень качества предоставляемых инфокоммуникационных услуг, а также расширение их перечня;
* рост требований к надежности и живучести инфокоммуникационных систем различного назначения;
* ужесточение норм на информационную безопасность для большинства сфер экономической и социальной жизни;
* формирование дружественного интерфейса [63], упрощающего пользователям доступ к инфокоммуникационным услугам;
* разработка системных решений и аппаратно-программных средств, ориентированных на требования людей с ограниченными возможностями.

Что касается первых трех тенденций, то с некоторыми допущениями можно принять за желаемую цель воплощение "принципа практической уверенности" [64]. Иными словами, вероятность неудачного развития событий должна стать столь малой величиной, что ей можно пренебречь. В качестве примера можно рассмотреть отказ в доступе к ресурсам Интернет для домохозяйства, имеющего резервное электропитание на случай отказа в сети переменного тока. Предположим, что в гипотетическом домохозяйстве возможность доступа к всемирной паутине реализована тремя разными способами:

1. посредством персонального компьютера по кабелю, который проложен Провайдером услуг "A";
2. за счет использования функций смартфона, который подключен в сеть Оператора связи "B";
3. включением спутникового телефона, обслуживаемого Оператором связи "C", который предоставляет доступ в Интернет.

Левый фрагмент рисунка 19 иллюстрирует техническую суть рассматриваемого решения. В правой части модели изображен граф, позволяющий оценить надежность доступа в Интернет при использовании предложенного способа резервирования. Вершины графа *a* и *b* служат моделями "комплексов" оборудования пользователя и трех сетей соответственно. Величины вероятности работоспособного состояния трех разных трактов обмена (ребер графа) данными обозначены так: *p*1, *p*2 и *p*3. Значения вероятности работоспособности вершин *a* и *b* можно принять за 100%, учитывая техническую базу для принятых решений.



Рисунок 19. Модель для оценки надежности доступа в Интернет

Взаимная независимость процессов отказов, которые могут возникать при попытке доступа к ресурсам Интернет, обусловлена природой рассматриваемой модели. По этой причине вероятность успешного доступа во всемирную паутину *R* определяется на основании правил теории надежности [19] следующим образом:

 (4)

Очевидно, что при *p*i > 0,999, что типично даже для не самых современных технических средств, *R* > 0,999999999. При таком уровне *R* можно полагаться на "принцип практической уверенности".

Формированием дружественного интерфейса, как отдельного направления исследований и разработок, специалисты в области телекоммуникационных сетей занимались почти с момента становления отрасли. Интересные прогнозы по развитию дружественного интерфейса содержатся в монографии [65], которая была опубликована тридцать лет назад. В ней сформулирована концепция долгосрочного развития телекоммуникационных сетей, названная VI&P – Visual, Intelligent and Personal. Эта концепция предполагала, что основными движущими силами, определяющими ключевые направления модернизации телекоммуникационных сетей, станут следующие:

* обмен видеоинформацией, так как основные сведения об окружающем нас мире мы получаем благодаря органам зрения;
* интеллектуализация оборудования электросвязи за счет использования информационных технологий;
* персонализация услуг и способов доступа к ним с максимально возможным учетом предпочтений пользователя.

Сегодняшний опыт позволяет утверждать, что прогноз тридцатилетней давности оказался точным. В монографии [65] определенное место отведено организации дружественного интерфейса. Следует подчеркнуть, что решение поставленной задачи намечалось для инфокоммуникационной системы в целом, так как возможности одних только телекоммуникационных сетей не позволяют получить желаемый эффект. Например, предполагалось, что удастся реализовать в режиме реального времени телефонный диалог абонентов, говорящих на разных языках. Очевидно, что для обеспечения такой услуги требуются не только современные средства связи. Успехи в разработке программного обеспечения, направленного на автоматический перевод текстов, и повышение производительности вычислительной техники позволяют надеяться, что рассматриваемая услуга будет реализована в обозримой перспективе с вполне приемлемыми качественными показателями.

Примером элемента дружественного интерфейса служит виртуальный [голосовой помощник](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B0%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D1%82) "Алиса", который создан компанией "[Яндекс](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D1%81)". Аналогичные решения были внедрены рядом других компаний. Важным направлением в разработке дружественного интерфейса следует считать его реализацию для пользователей с ограниченными возможностями.

Разработка системных решений и аппаратно-программных средств, ориентированных на требования людей с ограниченными возможностями, не исчерпывается созданием дружественного интерфейса. Важными факторами становятся функциональные возможности терминального оборудования и дополнительные атрибуты инфокоммуникационных услуг. Итогом усилий разработчиков соответствующих терминалов и программных продуктов будет весомый вклад в устранение барьеров, препятствующих человеку с ограниченными возможностями полноценно участвовать в жизни общества.

Примерами специализированных терминалов для людей с ограниченными возможностями служат устройства, преобразующие набранный на клавиатуре текст в речевые сигналы (text-to-speech) или выполняющие обратные операции (speech-to-text). Интересен также опыт японской компании NTT по разработке телефонов Raku-Raku (переводится как "легкий в использовании") для людей старшего возраста. Эти телефоны стали популярными из-за их удобных функций, о чем свидетельствует объем продаж, составивший 14 миллионов терминалов. Доступ в Интернет осуществляется нажатием одной кнопки. Пользователи имеют доступ к специальному веб-сайту с тщательно подобранной информацией, связанной с путешествиями и гастрономическими сведениями, в соответствии с потребностями пожилых людей. Предусмотрен ряд приложений, связанных с мониторингом состояния здоровья.

Важная роль в доступности инфокоммуникационных услуг отводится к сопровождению отображаемой информации субтитрами. Это важно не только для людей с ограниченными возможностями. Для значительной части пользователей подобные функции привлекательны при получении звуковой информации на родном и, особенно, на иностранном языке. Весьма перспективны разработки сложных пакетов программ, позволяющих в максимально возможной степени извлекать полезную информацию, предоставляемую инфокоммуникационными услугами. С этой целью необходимо провести анализ тех преимуществ, которые обеспечивают решения "Дополненная реальность" [66] и "Измененная реальность" [67].

**Проведение научных исследований и разработка методик проектирования**

Результаты научных исследований, прямо или косвенно относящихся к методикам проектирования телекоммуникационных сетей, представлены в публикациях, примерами которых служит ряд монографий и авторефератов [5, 14, 68– 73]. Проводятся также и конференции, посвященные – в том числе – методикам проектирования. Однако в последние десятилетия научные коллективы, занимающиеся разработкой методов расчета сетей, предпочитают не публиковать все полученные результаты, а продавать их в виде пакета программ. При этом покупатель обычно не в состоянии оценить эффективность предлагаемых решений, так он приобретает "кота в мешке".

Однажды профессора Попкова В.К., занимавшегося задачами оптимизации сетей связи [73, 74], попросили оценить корректность решений, которые для конкретного проекта были предложены авторами пакета программ, чтобы продемонстрировать эффективность своей продукции. В результате проверки оказалось, что решение поставленной задачи за счет использования известных, но достаточно сложных, методов оптимизации позволило найти вариант построения сети, который требует примерно на 20% меньше капитальных затрат. Этот случай не свидетельствует о том, что все предлагаемые пакеты программ для проектирования сети малоэффективны. Тем не менее, желательно тщательно протестировать подобные средства перед их использованием, что актуализирует проведение соответствующих научных исследований.

Еще одной важной задачей остается создание эффективной петли информационной обратной связи для всех участников инфокоммуникационного рынка. Один из примеров, стимулирующих интерес к созданию такой обратной связи, был приведен выше, на рисунке 6, который иллюстрировал различие между структурами транспортной сети, предлагаемыми проектными решениями и полученными после выполнения строительных работ. Использование петли информационной обратной связи позволит решить несколько задач, выходящих за рамки проблем проектирования инфокоммуникационных систем.

Для конкретизации словосочетания "обратная связь" – применительно к рассматриваемым ниже вопросам – обратимся к прямоугольникам, показанным на рисунке 20 [75], и к линиям между ними. Каждый из четырех прямоугольников отображает результаты работы, выполненные участниками инфокоммуникационного рынка на определенном этапе модернизации сети электросвязи. Пусть *Xi* – набор решений для *i-го* этапа развития сети, *Pij* – мера различия решений для этапов *i* и *j (j=i+1)*, *Qji* – мера эффективности петли обратной связи между разработчиками решений для этапов *i* и *j*.



Рисунок 20. Пример построения петли информационной обратной связи

Величины *Pij* и *Qji* уместно нормировать так, чтобы они менялись от нуля до единицы. При этом единичные значения величин обоих видов соответствуют ситуации, которая может рассматриваться как разработка оптимальных решений и достижение полноценного взаимодействия между всеми участниками инфокоммуникационного рынка. Нулевые значения для величин *Pij* и *Qji* свидетельствуют о невозможности реализовать предлагаемые решения и об отсутствии конструктивного взаимодействия между участниками инфокоммуникационного рынка. Численные значения предлагаемых оценок можно получить, например, за счет опроса экспертов.

Различия между оценками *Pij* порождаются, в значительной части всех случаев, объективными причинами. Существенная часть подобных причин обусловлена теми решениями, которые были приняты ранее. В этом смысле для телекоммуникационных сетей характерны свойства консервативности и инерционности, присущие большим и сложным системам [3, 5]. Для оценок *Qji* сложно привести более-менее точные данные, так как качество обратной связи в значительной мере обусловлено субъективными факторами – взглядами участников инфокоммуникационного рынка на полезность взаимодействия.

Для построения петли информационной обратной связи уместен подход, основанный на создании цифровых двойников [76]. С учетом сложности задач, формируемых современными инфокоммуникационными системами, продуктивной может оказаться идея построения сети цифровых двойников, предложенная в [77]. Для реализации подобных предложений также необходимо провести весьма сложные научные исследования.

**Выводы**

Успешное планирование сети электросвязи можно рассматривать как необходимое (но отнюдь не достаточное) условие для создания эффективной инфокоммуникационной системы. Трудоемкость исследований, которые должны быть выполнены для разработки полноценной методики планирования телекоммуникационной сети в виде пакета периодически обновляемых программных средств, велика. Затраты на такую работу не столь существенны, а ожидаемый экономический эффект – только за счет снижения необходимых инвестиций – значителен.

Данное утверждение основано на оценках, которые приведены в [5]. Они базируются на приближенных расчетах инвестиций, потраченных на приобретение цифровых АТС. Если бы процесс внедрения этих АТС осуществлялся с учетом предлагаемых научно обоснованных решений, то можно было сократить затраты не менее, чем на 200 млн. долларов США. Однако основная часть проектных решений была разработана без учета экономической и технической целесообразности перехода к цифровым АТС большой емкости с выносными концентраторами для построения сети доступа.

В настоящее время и в обозримой перспективе эффект подобного уровня может быть достигнуть при изменении принципов развития инфраструктурных сооружений [45], а также в случае качественного изменения парадигмы дальнейшего развития инфокоммуникационных систем. По этой причине постановка и решение задач по планирования телекоммуникационных сетей остаются актуальным направлением научных исследований.

**Литература**

1. Timothy Gowers T., Barrow-Green J., Leader I. The Princeton Companion to Mathematics. – Princeton University Press, 2010, 1056 p.

2. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. – М.: Книжный дом "Либриком", 2011, 192 с.

3. Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я. Сети электросвязи. – М.: Связь, 1977, 360 с.

4. Теория сетей связи: Учебник для вузов связи / В.Н Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс и др.; под ред. В.Н. Рогинского. – М.: Радио и Связь, 1981, 192 с.

5. Соколов Н.А. Задачи планирования сетей электросвязи. – СПб.: Техника связи, 2012, 432 с.

6. ITU-T. Recommendations Y.100-Y.999: Global information infrastructure. – URL: https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=Y (Дата обращения 13.04.2021).

7. Пинчук А.В., Соколов Н.А., Фрейнкман В.А. Общие принципы туманных вычислений. – Первая миля, 2018, №3, с. 38–45.

8. Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю., Самсонов М.Ю. Интернет вещей. – Самара: ПГУТИ, ООО "Издательство Ас Гард", 2014, 340 с.

9. Варакин Л.Е. Инфокоммуникации будущего. – Электросвязь, №11, 2003, с. 8–10.

10. Ilchenko M., Uryvsky L., Globa L. Advances in Information and Communication Technologies: Processing and Control in Information and Communication Systems. – Springer, 2019, 299 p.

11. Пинчук А.В., Соколов Н.А. Пять направлений развития сетей доступа. – Первая миля, 2017, №5, с. 30–35.

12. Bunge M. A General Black Box Theory. – Philosophy of Science, Vol. 30, No. 4, 1963, pp. 346–358.

13. Rapp Y. The Economic Optimum in Urban Telephone Network Problems. – Ericsson Technics, 1950, Vol. 49, pp. 1–132.

14. Жданов И.М., Кучерявый Е.И. Построение городских телефонных сетей. – М.: Связь, 1972, 136 с.

15. Дымарский Я.С. Задачи и методы оптимизации сетей связи. – СПб.: Издательство СПбГУТ, 2005, 205 с.

16. Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 440 с.

17. Hadjimichael G. From Brownfields and Greenfields to Multi-fields. – Scientific Journal of Riga Technical University. – 2011. – Vol. 37. P. 37–45.

18. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000, 468 с.

19. Острейковский В.А. Теория надежности. – М.: Высшая школа, 2008, 464 с.

20. ITU. Telecommunication Development Bureau. Telecom Network Planning for Evolving Network Architectures. Reference Manual (Draft version 5.1). – Geneva, 2008, 448 p.

21. Corne D.V., Oates M.J., Smith G.D. Telecommunications Optimization: Heuristic and Adaptive Techniques. – Wiley, 2000, 416 p.

22. Оре. О. Графы и их применение. – М.: КомКнига, 2006, 168 с.

23. Аткинсон Э.А., Банкер Р.Д., Каплан Р.С., Юнг М.С. Управленческий учет. – СПб.: Диалектика, 2019, 880 с.

24. Котов В.И. Риск-анализ на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств. – СПб.: Астерион, 2014, 219 с.

25. Helvoort H. The ComSoc Guide to Next Generation Optical Transport. SDH / SONET / OTN. – Wiley-IEEE Press, 2009, 224 p.

26. Чернышев Л.А., Штейн В.М. Кольцевые структуры в сельских цифровых распределительных системах. Электросвязь, № 6, 1985, с.29–33.

27. Кучерявый А.Е., Рогушин И.И., Соколов Н.А. Принципы построения местных цифровых сетей с интеграцией служб. – Электросвязь, 1988, № 10, с. 6–10.

28. Janevski T. NGN Architectures, Protocols and Services. – Wiley, 2014, 366 p.

29. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013, 160 с.

30. Линдгрен М., Бандхольд Х. Сценарное планирование. Связь между будущим и стратегией. – М.: Олимп-Бизнес, 2009, 256 с.

31. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, Third Edition 3rd Edition. – Academic Press, 2016, 616 p.

32. Network 2030: A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond. – White paper written by FG-NET-2030, 2019, 19 p.

33. Талеб Н.Н. Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости. – М.: [КоЛибри](https://www.ozon.ru/brand/1946322/), 2018, 736 с.

34. Beck G. The Overton Window. – Mercury Radio Arts, 2010, 321 p.

35. Соколов Н.А. Сценарии реализации концепции "Интернет вещей". – Первая миля, 2016, №4, с. 50–54.

36. Глущенко В.В. Прогнозирование. – М.: Вузовская книга, 2008, 248 с.

37. Ханк Д., Уичерн Д., Райтс А. Бизнес-прогнозирование. – М.: Вильямс, 2016, 656 с.

38. Куликов Н.А., Пинчук А.В., Соколов Н.А. Особенности разработки инновационных решений на длительную перспективу. – Первая миля, 2019, №5, с. 48–53.

39. Овсянников А.А. Общество потребления в России: системность и тотальность кризиса. – Вестник МГИМО-Университета, 2011, №3(18), с.222–235.

40. Ватульян А.О. Измерение расстояния между функциями. – Соровский образовательный журнал, 2000, №11, с. 123–127.

41. Леваков А.К. Особенности функционирования сети следующего поколения в чрезвычайных ситуациях. – М.: ИРИАС, 2012, 108 с.

42. Bayus B.L. An Analysis of Product Lifetimes in a Technologically Dynamic Industry – Management Science, 1998, № 44 (6), pp.763–775.

43. Levakov A.K., Sokolov N.A. Three algorithms for traffic limitation in emergencies. – Selected Papers of the IX Conference "Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems", Moscow, 2019, pp. 84–91.

44. Королев В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска. – М.: Физматлит, 2011, 620 с.

45. Ермаков А.В., Соколов Н.А., Федоров А.В. Задачи создания общей инфраструктуры для сетей разного назначения. – Информация и космос, 2020, №2, с. 6–11.

46. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2002, 392 с.

47. Kochenderfer M.J., Wheeler T.A. Algorithms for Optimization. – The MIT Press, 2019, 520 p.

48. Соколов Н.А. Сети абонентского доступа. Принципы построения. – Пермь, "Энтер-профи", 1999, 254 с.

49. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское Радио, 1975, 472 с.

50. Математическая энциклопедия. Том 3. – М.: Советская энциклопедия, 1982, 1184 с.

51. Salgues B. Society 5.0: Industry of the Future, Technologies, Methods and Tools (Technological Prospects and Social Applications). – Wiley, 2018, 302 p.

52. Леваков А.К. Сеть связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях. Анализ моделей телетрафика. – М.: ИРИАС, 2019, 124 с.

53. Маслоу А. Мотивация и личность. – СПб.: Питер, 2019, 400 с.

54. Попова Р.Р. Проблема определения понятия "событие" в психологии. – Вестник ТГГПУ, 2011, № 3 (25), с. 287–293.

55. Миков А.С. Анализ трафика при проведении "Горячей линии" Президента Российской Федерации. – Электросвязь, 2004, №8, с. 21–23.

56. Яковец Ю.В. Циклы. Кризисы. Прогнозы. – М.: Наука, 1999, 448 с.

57. Соколов Н.А. Принципы построения NGN – сети следующего поколения. – Доклады IX Международной конференции "Проблемы функционирования информационных сетей", Новосибирск, 2006, с. 274–275.

58. Кондратьев Н. Д. Проблемы экономической динамики. – М.: Экономика, 1989, 526 с.

59. Eden A.H., Moor J.H., Soraker J.H., Steinhart, E. Singularity Hypotheses. A Scientific and Philosophical Assessment. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 441 p.

60. Кучерявый, А.Е. Владыко А.Г., Киричек Р.В., Парамонов А.И., Прокопьев А.В., Богданов И.А., Дорт-Гольц А.А. Летающие сенсорные сети. – Электросвязь, 2014, № 9, с. 2–5.

61. Qiu Tie, Zhao Zhao, Zhang Tong, Chen Chen, Chen C.L.Philip. Underwater Internet of Things in Smart Ocean: System Architecture and Open Issues. – IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, Vol. 16, Issue 7, pp. 4297–4307.

62. Salam A., Raza U. Signals in the Soil: Developments in Internet of Underground Things. Springer, 2020, 448 p.

63. Магазанник В.Д., Львов В.М. Человеко-компьютерное взаимодействие. – Тверь, Триада, 2005, 199 с.

64. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Академия, 2005, 576 с.

65. H. Yamaguchi. Telecommunications: NTT’s vision of the future. – Tokyo, NTT publishing co., 1991, 184 p.

66. Varnum K.J. Beyond Reality: Augmented, Virtual, and Mixed Reality in the Library. – ALA Editions, 2019, 144 p.

67. 196. Леваков А.К., Соколов Н.А. Концепция "Измененная реальность". – Вестник связи, 2018, №11, с. 3–6.

68. Мархай Е.В. Основы технико-экономического проектирования городских телефонных сетей. – М.: Связьиздат, 1953, 424 с.

69. Мурдасов А.Б. Исследования в области оптимального построения городских телефонных сетей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: ЦНИИС, 1971, 17 с.

70. Бесслер Р., Дойч А. Проектирование сетей связи. – М.: Радио и связь, 1988, 267 с.

71. Крендзель А.В. Планирование перспективных сетей доступа. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, СПб.: СПбГУТ, 2001, 16 с.

72. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. – СПб.: Наука и техника, 2005, 240 с.

73. Попков В.К., Попков Г.В., Величко В.В. Математические основы моделирования сетей связи.– М.: Горячая линия–Телеком, 2012, 270 c.

74. Попков Г.В., Попков В.К. Вопросы проектирования, строительства и эксплуатации первичных сетей. – Проблемы информатики, 2013, № 4, с. 60–65.

75. Леваков А.К. Новые задачи обслуживания трафика в чрезвычайных ситуациях. – Электросвязь, 2014, №4, с. 27–29.

76. Cyber-physical Systems and Digital Twins: Proceedings of the 16th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation. – Springer, 2020, 862 p.

77. Seilov Sh. Zh., Kuzbayev A.T., Seilov A.A., Shyngisov D.S., Goikhman V.Yu., Levakov A.K., Sokolov N.A., Zhursinbek Y. Sh. The Concept of Building a Network of Digital Twins to Increase the Efficiency of Complex Telecommunication Systems. – Complexity (Special Issue), vol. 2021, Article ID 9480235, 9 p.