

УДК 681.324

СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

B.M. Гостев

Аннотация

В статье анализируется проблема проектирования сетей передачи данных (СПД), рассматриваются методы и технологии структурного и параметрического синтеза СПД на базе системы оптимизации проектирования (СОПР). Приводится описание комплекса программ оптимизации проектирования СПД.

1. Проблема проектирования сетей передачи данных

Широкое внедрение инфокоммуникационных технологий становится сегодня неотъемлемой частью процессов развития экономики, социальной сферы, системы государственного управления. В этих условиях крупные промышленные предприятия, финансовые и торговые организации, учреждения образования, науки, здравоохранения, органы государственной власти и др. активно создают и используют в бизнес-процессах собственные корпоративные компьютерные сети (ККС) как локальные, так и территориально распределенные.

Территориальная компьютерная сеть (ТКС) представляет собой ассоциацию территориально рассредоточенных вычислительных комплексов различного типа и назначения, взаимодействующих между собой с целью предоставления пользователям, независимо от их месторасположения, услуг по хранению, передаче и обработке информации, а также обеспечения доступа к информационным и вычислительным ресурсам компьютерной сети (см., например, [1–6]).

Основное назначение корпоративной ТКС – обеспечение высококачественного информационного взаимодействия подразделений (и отдельных сотрудников) корпорации, которые могут находиться на значительном удалении друг от друга, располагаться в различных городах и даже странах. Корпоративные сети должны обеспечивать прежде всего высокую надежность, скорость и безопасность передачи информации.

Использование в качестве коммуникационной базы ККС общедоступных компьютерных сетей, входящих в интернет, не обеспечивает выполнения повышенных требований к качеству обслуживания, предъявляемых к ККС. Дело в том, что бурный рост количества услуг, предоставляемых интернетом, нередко приводит к перегрузке узлов и каналов связи, что резко снижает скорость и надежность передачи информации. При этом поставщики услуг интернета не несут никакой ответственности за функционирование сети в целом, а каналы связи развиваются крайне неравномерно. Соответственно, нет никаких гарантий качества работы сети, скорости передачи данных и даже просто достижимости отдельных компьютеров. Очевидно, что интернет не гарантирует и безопасности: непредсказуемость маршрутов передачи данных между множеством независимых узлов не только повышает риск перехвата информации, но и делает невозможным определение места

утечки информации. Другой аспект проблемы безопасности также связан с децентрализованностью интернета: здесь отсутствуют эффективные механизмы управления доступом к ресурсам частных сетей. Именно поэтому более надежным и эффективным подходом к решению проблемы передачи корпоративной информации является создание крупными предприятиями, организациями, ведомствами и т. д. собственной коммуникационной базы – сетей передачи данных.

Сеть передачи данных (СПД) представляет собой аппаратно-программную базу (ядро) ТКС (см., например, [3, 4, 6]). Основу СПД образуют узлы коммутации (УК), соединяемые между собой каналами передачи данных (КПД), обеспечивающими взаимодействие УК друг с другом. УК осуществляют управление процессами передачи потоков данных по СПД и реализуются обычно на базе высокопроизводительных многопротокольных маршрутизаторов. Стоимость маршрутизатора зависит от его производительности (пропускной способности), измеряемой количеством пакетов, обрабатываемых в единицу времени, а также от количества, типов и быстродействия интерфейсов, поддерживаемых протоколов и т. д. Каналы передачи данных СПД создаются на базе выделенных (арендуемых) каналов сетей связи общего назначения, каналов цифровых сетей. Стоимость аренды каналов зависит прежде всего от их пропускной способности и расстояния между соединяемыми пунктами.

В процессе проектирования СПД необходимо выбрать топологическую структуру СПД, то есть определить количество и места размещения УК СПД, а также определить для каждого УК, с какими другими УК он будет непосредственно соединен каналами передачи данных; выбрать из номенклатуры доступных технических средств конкретные модели маршрутизаторов (по стоимости и пропускной способности) для установки в каждый УК; выбрать пропускную способность каждого канала (определяющую стоимость его аренды) и основные маршруты передачи пакетов данных между каждой парой УК СПД.

Основными критериями оценки проекта СПД являются:

- ожидаемые временные характеристики передачи данных – среднее и максимальное время задержки сообщений и пакетов в СПД – определяющие время реакции сети (качество обслуживания абонентов СПД);
- пропускная способность (общая производительность) СПД;
- стоимостные характеристики, включающие капитальные затраты на оборудование узлов коммутации, а также эксплуатационные расходы (стоимость аренды каналов связи); в качестве интегральной характеристики может быть взята приведенная стоимость.

Решения по выбору типов и параметров маршрутизаторов и каналов должны быть согласованы между собой и обеспечивать совместимость всех компонентов СПД по стандартам, интерфейсам и протоколам.

Наряду с основными (временными и стоимостными) характеристиками, которые могут быть вычислены и оценены для конкретного проекта, важными также являются такие трудноформализуемые (и потому трудноизмеримые, но вполне идентифицируемые) качественные показатели, как надежность СПД, определяемая, в частности, надежностью аппаратуры УК и КПД, наличием в сети дополнительных путей передачи данных, вероятностями потерь и искажений передаваемой информации, отказа в обслуживании и др. Кроме того, при разработке проекта может оказаться необходимым предусмотреть резерв по подключениям к СПД новых абонентов и учесть прогнозируемую динамику увеличения внешней нагрузки и развития сети, поэтапность ввода отдельных участков сети в эксплуатацию.

Принятие всех проектных решений взаимообусловлено и требует учета большого количества факторов. Так, например, выбор топологии СПД влияет прежде

всего на стоимость сети. Однако этот выбор, совместно с другими проектными решениями, влияет и на надежность сети, и на величины временных задержек при передаче пакетов по каналам от источников к адресатам. Выбор пропускных способностей маршрутизаторов и КПД определяет стоимость сети и временные задержки пакетов. Без решения задачи маршрутизации, определяющей распределение потоков данных по узлам и каналам связи, не могут быть определены величины задержек при передаче пакетов. При этом критерии качества проекта обычно вступают в противоречие друг с другом. Например, трудно найти компромисс между объемом средств, выделяемых на создание СПД, надежностью, средним временем задержки при передаче пакетов между УК, пропускной способностью СПД и др.

Таким образом, проблема проектирования СПД является сложной многокритериальной проблемой, для которой характерны противоречивость и плохая формализуемость совокупности требований, предъявляемых к СПД.

2. Математическое обеспечение системы оптимизации проектирования СПД

Для комплексного решения общей проблемы проектирования СПД и решения частных задач оптимизации проектных решений предложены различные методы и технологии.

Пусть топология СПД определяется графом $G = (V, U)$, где множество вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ представляет собой множество узлов коммутации СПД, а множество ребер $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество каналов передачи данных. Обозначим через c_k , $k = 1, \dots, m$, пропускные способности каналов передачи данных, через f_k , $k = 1, \dots, m$, – интенсивности потоков по каналам, через γ – суммарный трафик по сети.

В монографии [7] предложена оценка средней задержки сообщений на каналах при передаче по СПД:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^m \frac{f_k}{c_k - f_k}, \quad (1)$$

имеющая место при определенных, достаточно жестких, предположениях (регуляризация Клейнрока, см. [1]).

Проблема проектирования СПД формулируется следующим образом. Заданы множество УК $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ и матрица внешней нагрузки $\Gamma = (\gamma_{ij})$. Необходимо найти такое множество ребер $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, описывающее структуру каналов передачи данных СПД, пропускные способности $c = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ соответствующих КПД и распределение передаваемых по КПД потоков $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, соответствующее матрице нагрузки $\Gamma = (\gamma_{ij})$, которые минимизируют суммарную стоимость сети при ограничении на среднюю задержку на каналах связи и обеспечении заданной степени связности графа $G = (V, U)$.

Наиболее известным и обоснованным методом решения этой задачи является так называемый вогнутый метод удаления ребер (ВМУР; Concave Branch Elimination Method [3, 7–11], общая схема которого состоит в следующем.

1. Некоторым образом задается исходная топология сети в виде полносвязного или сильносвязного графа $G = (V, U)$, и выбирается некоторое начальное распределение потоков, соответствующее матрице нагрузки $\Gamma = (\gamma_{ij})$.

2. Решается задача оптимального выбора пропускных способностей каналов $c = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$.

3. Методом отклонения потока [7, 8, 12] решается задача оптимизации распределения потоков с целью минимизации средней временной задержки (1) на каналах

СПД при передаче пакетов по сети. Этапы 2 и 3 повторяются с новыми распределениями потоков, пока происходит уменьшение стоимости сети.

4. Если уменьшения стоимости сети не происходит, то производится удаление ребер графа с нулевыми потоками, если это не нарушает ограничения на связность.

Метод, используемый на этапах 2 и 3, как показано, например, в [13], сходится и дает в общем случае только локальный оптимум, зависящий от выбираемого начального распределения потоков, поэтому авторы предлагают провести для одной и той же начальной топологии ряд расчетов с различными, случайно выбираемыми начальными распределениями потоков и выбирать лучший из достигнутого. По тем же причинам в [7] предлагается также проводить ряд аналогичных расчетов для различных исходных топологий. Таким образом, для решения задачи используется технология вариантных расчетов для различных исходных топологических структур СПД и при различных случайных начальных распределениях потоков.

В работе [14] для решения рассматриваемой задачи предложен метод насыщения сечений (Cut-Saturation Method; см. также [3, 7, 8, 12, 13]). В основе метода лежит понятие «насыщенного сечения», включающего самые загруженные каналы. Общая схема метода насыщения сечений (НС) состоит в следующем.

1. Выбирается начальная топология $G = (V, U)$, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ и пропускные способности КПД $c = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$.

2. Методом отклонения потока решается задача отыскания распределения потоков $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, минимизирующего среднюю временную задержку на каналах (1).

3. Определяется насыщенное сечение и наименее загруженные каналы.

4. Проектировщик на основе анализа полученного решения осуществляет попытки добавления каналов и увеличения пропускных способностей загруженных каналов (для уменьшения временных задержек), а также исключения слабозагруженных каналов (для уменьшения стоимости сети), контролируя при этом степень связности сети. После этого для оценки результатов произведенных изменений осуществляется переход на этап 2 и итеративное продолжение процесса. При получении приемлемого проекта работа завершается.

Для выбора включаемых и исключаемых каналов в методе НС в [13, 14] предложен ряд эвристических формальных и плохо формализуемых приемов, которыми может руководствоваться проектировщик (предполагается, что окончательные решения принимает сам проектировщик).

Таким образом, метод насыщения сечений, ориентированный на использование опыта и интуиции проектировщика (см. [3]), представляет собой, по сути, итеративную человеко-машинную технологию формирования проекта СПД минимальной стоимости при ограничениях на среднюю задержку сообщений и связность сети.

В работе [11] предложен метод групповой оптимизации, являющийся одной из возможных полных алгоритмических формализаций метода насыщения сечений. В этой же работе предложен итеративный метод М-структур, в котором сначала по специальному алгоритму осуществляется выбор начальной избыточной топологии сети. Затем выполняется поиск избыточного ребра, удаление которого после оптимального перераспределения потоков и оптимизации пропускных способностей каналов позволяет уменьшить стоимость сети. Если на некоторой итерации удаление ни одного из ребер не приводит к улучшению результата, работа метода завершается.

Близкий по схеме к методу М-структур итеративный метод последовательного удаления ребер предложен в работе [6]. В этом методе в качестве исходной топологии СПД берется полностью связный граф, распределение потоков осуществляется по путям минимальной длины, а в качестве кандидатов на удаление последовательно пробуются минимально загруженные ребра.

В работах [15, 16] для решения комплексной задачи проектирования СПД ТКС предложены комбинаторные методы, основанные на полном переборе всех допустимых по условию связности топологий, решении для каждой из них задач оптимального распределения потоков и выбора пропускных способностей и выборе наилучшей топологии среди них.

Отметим также методы для решения частных задач проектирования и основанную на них технологию решения общей проблемы, предложенные в работе [17], которые ориентированы на получение одинакового, равного для всех каналов коэффициента нагрузки.

Все рассмотренные известные методы решения комплексной проблемы проектирования СПД могут быть использованы при проектировании СПД ТКС, тем более, что некоторые из них успешно применялись при разработке ряда крупных проектов (например, ARPA, «Сирена», сеть ВЦКП Украины). Однако трудно надеяться на то, что какой-либо один из них или даже все вместе они дадут возможность разработать качественный проект СПД, подходящий для практического использования в современных условиях.

Дело в том, что, во-первых, в этих методах не учитываются задержки в узлах коммутации. По-видимому, это можно объяснить тем, что критическими компонентами СПД считались каналы передачи данных с относительно низкими пропускными способностями, в то время как процессоры в УК обладали относительно более высокой производительностью. В современных условиях, когда в СПД используются высокоскоростные каналы (например, на базе оптоволоконных линий связи), задержки в узлах коммутации могут оказаться одного порядка с задержками в КПД, поэтому в процессе проектирования необходимо обеспечить также и контроль узловых задержек. Во-вторых, рассмотренные выше известные методы оптимизации проектирования СПД, в частности методы оптимального выбора пропускных способностей каналов, практически непригодны для решения задач проектирования СПД при несимметричной нагрузке на сеть, а этот случай типичен для современных условий, когда в компьютерной сети выделяются специализированные серверы приложений и баз данных. Кроме того, существующие методы оптимизации выбора топологической структуры СПД не отличаются разнообразием и предоставляют проектировщику мало возможностей для синтеза эффективной структуры. Наконец, как показывают результаты вычислительных экспериментов (см. [23]), маршрутизация потоков в сети, основанная на минимизации средних временных задержек, может приводить к существенному снижению пропускной способности СПД. Поэтому необходима разработка методов оценки пропускной способности СПД и методов маршрутизации, направленных на повышение пропускной способности СПД.

Обозначим через g_j среднюю интенсивность потока данных через узел $v_j \in V$ (бит в секунду), через q_j – пропускную способность УК $v_j \in V$ (пакетов в секунду), через h – размер пакета в битах. Если рассматривать каждый УК как систему массового обслуживания М/М/1, то есть считать, что входной поток пакетов в узел $v_j \in V$ является пуассоновским со средней интенсивностью g_j/h пакетов в секунду, а время обработки пакета в УК является непрерывной случайной величиной, определенной по экспоненциальному закону со средним значением $1/q_j$, то в предположении, что задержки пакетов в УК при передаче по сети являются независимыми случайными величинами, для оценки средней задержки в узлах коммутации можно предложить следующее выражение (см. [22]):

$$T_v = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n \frac{g_j}{q_j - g_j/h}, \quad (2)$$

где p – суммарная интенсивность потоков, порожденных внешними обращениями к СПД (бит в секунду).

Для оценки приемлемости выражения (2) была разработана и реализована имитационная модель СПД. Проведенные с использованием этой модели вычислительные эксперименты для небольших по размерам сетей с различной топологической структурой и при различных характере распределения и величине нагрузки на сеть показали хорошее согласование средней задержки пакетов в УК, полученное по результатам экспериментов, и средней задержки, вычисленной по формуле (2). Поэтому ее можно считать пригодной для практических расчетов и в теоретических рассмотрениях. Это позволяет более полно оценить временные задержки при передаче пакетов данных по СПД.

Задача оптимального выбора пропускных способностей каналов при несимметричной нагрузке на СПД может быть сведена к решению системы алгебраических уравнений 4-го порядка с m неизвестными [24], не позволяющей получить решение в аналитической форме, поэтому разработан численный метод решения этой задачи, дающий решение с любой заданной точностью; также предложено приближенное решение задачи в аналитической форме, дающее весьма малую погрешность. Кроме того, поставлена и решена задача оптимального выбора пропускных способностей узлов коммутации СПД при линейных функциях стоимости, основанная на оценке (2) (см. [24]). Также для решения задач оптимального выбора пропускных способностей каналов и узлов для случая выбора пропускных способностей из дискретного ряда значений разработаны эффективные алгоритмы, основанные на методе динамического программирования.

Представляется (и вычислительные эксперименты это подтверждают), что важной характеристикой топологической структуры СПД является суммарная длина кратчайших путей между всеми парами вершин «источник – адресат», поэтому задача оптимального выбора топологической структуры СПД может быть поставлена следующим образом. Пусть задан граф возможных соединений $G_0 = (V, U_0)$, где V – множество УК, U_0 – множество возможных КПД. Для каждого КПД $u \in U_0$ задана длина $a(u)$ и стоимость $b(u)$. Для любого подмножества каналов $U \subset U_0$, сохраняющего связность графа, можно определить кратчайшие пути между всеми парами вершин $v_k, v_l \in V$. Обозначим длину кратчайшего пути из УК $v_k \in V$ в УК $v_l \in V$ через d_{kl} . Необходимо выбрать такое подмножество каналов $U \subset U_0$, чтобы получившийся граф топологической структуры СПД $G = (V, U)$ был связным, суммарная длина кратчайших путей между всеми парами вершин $\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n d_{kl}$ была минимальной при условии, что суммарная стоимость каналов $\sum_{u \in U} b_u$ не превосходит заданной величины B . Эта задача относится к классу труднорешаемых задач, поэтому для ее решения предложен и экспериментально исследован ряд эффективных приближенных методов, показавших хорошие результаты.

Задачу максимизации пропускной способности СПД рассмотрим в следующей постановке. Пусть задана топология СПД в виде графа $G = (V, U)$, заданы пропускные способности каналов передачи данных и узлов коммутации, а также нормированная матрица характера распределения внешней нагрузки $W = (w_{kl})$, где $\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n w_{kl} = 1$. Тогда при величине суммарной интенсивности внешней нагрузки p для всех пар УК $v_k, v_l \in V$ требуется передать потоки интенсивностью $p_{kl} = pw_{kl}$. Необходимо найти максимально возможную величину p такую, что СПД способна передать эти потоки. Решение сформулированной задачи оптимального распределения потоков по сети, максимизирующего суммарную нагрузку на сеть при задан-

ном характере распределения внешней нагрузки, может быть сведено к решению задачи линейного программирования. Однако сложность этой задачи быстро растет с ростом количества УК в сети. Так, если для $n = 10$ количество неизвестных переменных в этой задаче может достигать нескольких тысяч, то уже для $n = 20$ количество неизвестных переменных может достигать нескольких миллионов. Поэтому разработаны эффективные приближенные методы оценки предельной пропускной способности СПД и методы маршрутизации потоков данных (в том числе фиксированной), направленные на повышение пропускной способности СПД.

Математическое обеспечение системы оптимизации проектирования СПД состоит как из всех известных, положительно зарекомендовавших себя, так и представленных выше новых математических моделей, численных методов и алгоритмов решения задач анализа, оценки и оптимизации проектирования СПД.

3. Технологии оптимизации проектирования СПД и их программное обеспечение

Сложность проблемы проектирования СПД не позволяет сформулировать математическую задачу, описывающую всю проблему целиком. Как отмечается, например, в [3], «задача оптимизации СПД настолько сложна, что нет никакой надежды решить ее в общем виде».

Представляется, что справиться со сложностью проблемы проектирования СПД могут помочь интерактивные человеко-машические технологии, в которых ведущая роль в процессе проектирования принадлежит опытному проектировщику [21]. Именно он, основываясь на своем опыте, на своем знании особенностей построения и функционирования компьютерных сетей, на своем понимании конкретной ситуации и ее перспектив, способен вырабатывать проектные решения и варианты проекта, стремясь учесть во всей возможной полноте требования к СПД и особенности реальной ситуации. Интерактивный режим проектирования позволяет сочетать интуицию и интеллектуальные способности человека-проектировщика к неформальному решению задач с вычислительными возможностями компьютера, позволяющими решать сложные математические задачи анализа, оценки и оптимизации проектирования СПД.

Исходную проблему можно попытаться решить последовательным путем.

На первом этапе можно выбрать вариант топологической структуры СПД, например, на основе показателей, оценивающих качество топологической структуры (связность, общая длина каналов, наличие нескольких путей передачи данных между УК). На следующем этапе для выбранного варианта топологии СПД может решаться, например, проблема выбора маршрутов; при этом формируется вариант распределения потоков по сети, например, по кратчайшим путям. Полученное решение служит основой для третьего этапа – выбора пропускных способностей УК и КПД.

В результате выполнения трех этапов формируется полный вариант проекта СПД, который уже может быть оценен с точки зрения критериев качества и эффективности СПД – стоимости СПД, средних и максимальных задержек при передаче пакетов и сообщений по сети, пропускной способности сети при различном характере распределения внешней нагрузки, надежности и т. д. Здесь для полного варианта проекта могут проявиться недостатки принятых проектных решений. В этом случае, чтобы улучшить характеристики проекта, проектировщик может попытаться скорректировать выбор пропускных способностей, сделанный на последнем этапе, либо вернуться на предыдущий этап (выбора маршрутов и распределения потоков), чтобы попытаться улучшить полученный вариант проек-

та СПД за счет корректировки принятых на этом этапе проектных решений, либо вернуться на первый этап для корректировки топологической структуры СПД с целью ее улучшения, а затем снова выполнить второй и третий этапы.

Таким образом, при описанном подходе процесс решения исходной проблемы проектирования СПД представляется в виде последовательности решения трех подпроблем. При этом любое возможное решение первой подпроблемы последовательности, определяя и фиксируя компоненты проекта СПД, одновременно определяет основу и исходные данные для решения следующей подпроблемы. В свою очередь, любое возможное решение второй подпроблемы определяет и фиксирует значения других компонентов проекта СПД, что делает более определенной третью подпроблему. В результате сложная исходная проблема разбивается на последовательность более простых подпроблем, а согласованное решение всех подпроблем и будет решением исходной проблемы проектирования СПД. При этом осуществляется вертикальная декомпозиция проблемы. Описанную технологию решения проблемы проектирования СПД назовем Д-технологией.

Д-технология предусматривает последовательное выполнение этапов проектирования для решения соответствующих частных подпроблем. Если попытки улучшения проекта на более поздних этапах не дают желаемого эффекта, осуществляется пересмотр проектных решений, принятых на более ранних этапах, или даже выработка и рассмотрение другого структурного варианта проекта. Неоднократный возврат и повторение пройденных этапов на новом витке спирали позволяет провести последовательное взаимное согласование, балансировку и взаимоувязку решений частных подпроблем. В ходе итеративного решения общей проблемы у проектировщика происходит накопление знаний об условиях и особенностях решаемой проблемы, последствиях принимаемых проектных решений, приходит лучшее понимание особенностей конкретного проекта, пределов достижимости целей и той цены, которую приходится платить за необходимый результат, что позволяет выявить направления корректировки проектных решений. В ходе процесса выявляется взаимное влияние различных критериев и их соотношение, осуществляется шлифовка варианта проекта.

Итак, Д-технология представляет собой итеративную, интерактивную схему, в которой используются методы и алгоритмы решения задач оптимизации структурного синтеза СПД, методы и алгоритмы решения задач оптимизации выбора пропускных способностей каналов и УК и задач оптимизации распределения потоков по сети (маршрутизации), а также модели анализа функционирования сети заданной структуры, позволяющие оценить ее функциональные характеристики.

Возможна и другая последовательность решения подпроблем: после выбора на первом этапе варианта топологической структуры СПД на этой основе осуществляется выбор пропускных способностей каналов и УК и уже на этой основе осуществляется решение проблемы выбора маршрутов. Возможен также вариант Д-технологии, в котором этапы выбора маршрутов и выбора пропускных способностей объединены в один, при этом, естественно, эти две задачи решаются проектировщиком с использованием соответствующих методов одновременно и совместно. Возможны и другие варианты реализации Д-технологии.

Нетрудно увидеть, что Д-технология является обобщением технологии вариантных расчетов на базе вогнутого метода удаления ребер (ВМУР), рассмотренного выше, то есть в рамках Д-технологии может быть реализовано, в частности, и применение ВМУР.

В некоторых проектных ситуациях более эффективным может оказаться комплексный подход к решению проблемы проектирования, позволяющий проектировщику работать с полным вариантом проекта.

Конечные характеристики проекта (стоимостные, временные, а также характеристики надежности и производительности) могут быть определены и оценены только для полного варианта проекта, то есть такого варианта, для которого выбраны некоторые варианты всех проектных решений. Поэтому в тот момент, когда в Д-технологии выбираются топология и маршруты или топология и пропускные способности каналов и узлов коммутации, еще невозможно предвидеть, как это скажется на окончательных характеристиках СПД, и трудно сделать обоснованный выбор. Если желательные характеристики сети не достигнуты, приходится возвращаться и пытаться корректировать проектные решения; при этом принятие проектных решений происходит в ситуации, когда нет возможности сразу оценить результаты. Поэтому может иметь смысл сначала сформировать начальный полный вариант проекта СПД, включающий решения по топологии, маршрутам и пропускным способностям, и, оценив его интегральные характеристики, в дальнейшем провести детальную проработку полного варианта проекта сети, пытаясь последовательно его улучшить за счет воздействия как на различные отдельные компоненты проекта, так и на их комбинации в комплексе – и на элементы топологии, и на распределение потоков, и на пропускные способности. Технологию, основанную на этой идеи, будем называть К-технологией.

К-технология – это технология, ориентированная на комплексный (совместный) выбор всех компонентов проектного решения, то есть получение полного варианта проекта СПД (включающего выбор решений по топологии, маршрутам, пропускным способностям) и оценку его интегральных характеристик. При использовании К-технологии проектировщик все время работает с полными вариантами проекта. Он может одновременно (в рамках одной проектной операции) изменять и какие-то элементы топологии, и отдельные маршруты, и пропускные способности. Кроме того, он может попытаться изменить единственный элемент полного решения и посмотреть, как это повлияет на проект в целом.

Отметим, что К-технология является обобщением известного метода оптимизации проектирования СПД – метода насыщения сечений, рассмотренного выше.

Таким образом, процесс проектирования СПД представляет собой итеративный циклический процесс, являющийся сочетанием метода проб и ошибок и целенаправленного перебора вариантов решения. В процессе работы проектировщик может, основываясь на интуитивных соображениях, знаниях и опыте, а также используя формализованные методы, формировать варианты проекта, его компонентов, анализировать и оценивать их особенности и степень достижения целей, определять направления изменения вариантов проекта, сравнивать варианты проекта и проектных решений между собой и отбирать перспективные варианты для дальнейшей работы с ними, экспериментировать с вариантами проекта и проектных решений.

Для успешного применения рассмотренных технологий проектирования СПД и их вариантов требуется достаточно мощная компьютерная поддержка, включающая реализации формализованных методов решения частных задач оптимизации проектирования СПД – выбора топологической структуры СПД, распределения потоков (маршрутизации), выбора пропускных способностей КПД и УК – и оценки ее характеристик.

Кроме того, для эффективного использования технологий необходим комплекс средств поддержки процесса выработки решений, включающий:

- средства формирования и изменения вариантов проекта и проектных решений как путем непосредственного манипулирования значениями компонент СПД (проекта), так и с использованием «интеллектуальных» средств, реализующих различные формализованные методы;

- средства представления в различной форме вариантов проекта и их компонентов (различные экранные формы представления);
- средства анализа и оценки параметров и характеристик вариантов проекта при различных предположениях и внешних условиях;
- средства сравнения вариантов решений между собой по совокупности их характеристик (например, табличные средства парных и групповых сравнений);
- средства организации работы с совокупностью выработанных вариантов проекта.

С помощью методов формального синтеза может быть осуществлено формирование вариантов проектных решений, обладающих заданными свойствами или удовлетворяющих заданным условиям, поэтому формализованные методы могут использоваться в качестве формирователей начальных вариантов проектных решений, достраивателей и улучшателей имеющихся вариантов проектов СПД.

В процессе решения проблемы проектирования СПД проектировщик имеет возможность создавать и прорабатывать несколько вариантов проекта СПД, различающихся между собой, например, способами соединения узлов каналами передачи данных, пропускными способностями КПД и УК, маршрутами передачи данных.

Варианты проектных решений отображаются в различных экранных формах представления. Формы представления служат для восприятия, идентификации и первой, самой общей оценки проектировщиком варианта решения, в том числе – по некоторым плохо формализуемым и неформализуемым критериям. Экранные формы оценки служат для всесторонней оценки полного или частичного варианта проекта СПД. Для сравнения выработанных вариантов проектных решений между собой разработаны средства как парного сравнения, так и сравнения произвольного числа вариантов проектных решений, а также экранные формы представления результатов сравнения.

Для реализации рассмотренных технологий разработан состав и структура программного обеспечения (ПО) системы оптимизации проектирования (СОПР) СПД. ПО СОПР СПД представляет собой комплекс программ, обеспечивающих поддержку всех пригодных для использования методов решения задач анализа и оптимизации проектирования СПД (как известных, так и специально разработанных), а также программ визуализации вариантов проектов СПД и проектных решений, программ оценки характеристик вариантов проектов и их сравнения.

Программное обеспечение СОПР поддерживает процессы проектирования на основе Д- и К-технологий и позволяет решать задачи оптимизации структурно-топологического проектирования СПД, выбора маршрутов и пропускных способностей УК и СПД, проводить расчеты и оценки параметров проектируемых сетей на основе использования их моделей, сравнение различных проектных решений и оценку их эффективности, оптимизацию проектных решений по критериям стоимости, надежности, производительности и величин временных задержек.

Комплекс программ был использован для решения ряда практических задач, в частности, для оценки характеристик корпоративной компьютерной сети образовательных учреждений Республики Татарстан (РТ) [27]. Разработанные модели были применены для оценки характеристик СПД единой образовательной информационной среды РТ. Были проведены вычислительные эксперименты по оценке предельных пропускных способностей и временных характеристик для вариантов СПД с различными топологическими структурами, маршрутами передачи данных, пропускными способностями УК и КПД, размерами передаваемых пакетов. Получены оценки межузловых средних задержек при передаче пакетов по СПД, в том числе их канальные и узловые составляющие, а также оценки интегральных временных характеристик СПД – средней и максимальной задержек пакетов. Иссле-

довано влияние характера внешней нагрузки на значение предельной пропускной способности СПД.

Кроме того, некоторые идеи по составу, структуре и организации функционирования СОПР реализованы в учебно-исследовательской системе автоматизированного проектирования информационных компьютерных сетей, которая на протяжении ряда лет используется в учебном процессе факультета вычислительной математики и кибернетики Казанского государственного университета.

4. Учебно-исследовательская САПР информационных компьютерных сетей

В качестве прототипа СОПР, а также технологической базы для отработки методики проектирования и создания программного, информационного, организационного обеспечения СОПР СПД, экспериментальной оценки трудоемкости реализации разработанной архитектуры СОПР СПД, оценки эффективности новых математических методов оптимизации проектирования СПД разработана и создана учебно-исследовательская система автоматизированного проектирования (УИ САПР) информационных компьютерных сетей [18, 19, 25, 26]. Наряду с базовыми концепциями СОПР СПД, в УИ САПР также реализованы основные концепции и некоторые элементы архитектуры системы поддержки выработки решений [20], адаптированной для целей обучения.

УИ САПР обеспечивает поддержку многоэтапного итеративного человекомашинного процесса проектирования сетей передачи данных и сетей доступа. Организация процесса выработки и принятия решений в УИ САПР позволяет сочетать интеллектуальные способности пользователя к неформальному решению задач, основанные на его знаниях, опыте и интуиции, с вычислительными возможностями компьютера, позволяющими решать сложные оптимизационные задачи проектирования.

УИ САПР позволяет решать задачи структурно-топологического и параметрического проектирования сетей, проводить расчеты и оценки параметров проектируемых сетей на основе использования их моделей, сравнение проектных решений и оценку их эффективности, оптимизацию проектных решений по критериям стоимости, надежности, производительности и величин временных задержек.

УИ САПР состоит из функциональных и обеспечивающих (обслуживающих) подсистем.

Функциональные подсистемы реализуют определенный этап проектирования или группу непосредственно связанных проектных задач (выполняют проектные процедуры). Обеспечивающие подсистемы, имеющие общесистемное назначение, осуществляют поддержку работы функциональных подсистем. Совокупность обеспечивающих подсистем образует системную среду (оболочку) САПР. Основными функциями системной среды САПР являются управление процессом проектирования, управление данными, реализация интерфейса с проектировщиком.

Функциональные подсистемы обеспечивают решение проектных задач в автоматическом и ручном режимах.

Подсистема структурно-топологического проектирования (СТП) включает комплекс программ, реализующих методы оптимизации проектирования топологической структуры СПД и средства поддержки ручного проектирования (построение начальной топологии сети, ее дальнейшее достраивание, улучшение). В рамках подсистемы реализованы алгоритмы решения следующих основных задач: построение начальной топологии (метод М-структур), построение графа с заданной степенью вершин, построение графа с минимальной суммарной длиной кратчайших путей

между всеми парами вершин при ограничении на стоимость, алгоритмы оптимального достраивания и улучшения топологической структуры СПД.

Подсистема выбора маршрутов (ВМ) включает комплекс программ решения задач маршрутизации потоков данных: метод отклонения потоков для минимизации средней задержки, алгоритмы минимизации максимальной задержки, алгоритмы маршрутизации по кратчайшим путям, различные методы распределения потоков, направленные на повышение пропускной способности СПД.

Подсистема выбора пропускных способностей включает комплекс программ, реализующих методы оптимального выбора пропускных способностей УК и КПД, средства достраивания и улучшения вариантов, средства поддержки работы с вариантами. Также предусмотрены средства, поддерживающие ручной ввод пропускных способностей.

Подсистема моделирования внешней нагрузки содержит средства формирования различных вариантов распределения внешней нагрузки на сеть.

Подсистема оценки качества и эффективности функционирования (ОКЭФ) обеспечивает решение задач расчета характеристик проектируемых сетей и критериев оценки качества их функционирования при различном характере распределения внешней нагрузки на сеть (средние и максимальные задержки пакетов, оценка предельной пропускной способности и стоимости проектируемой сети и т. д.). В этой подсистеме также решаются задачи моделирования отказов в работе сетей и оценки качества функционирования сетей в этих условиях, что позволяет выявить «узкие места» того или иного варианта сети.

Работоспособность функциональных подсистем УИ САПР поддерживают следующие обеспечивающие подсистемы.

Подсистема управления процессами проектирования (монитор) обеспечивает общее управление работой системы. При запуске системы монитор производит ее инициализацию и настройку, обеспечивает при необходимости автоматическое восстановление состояния системы, в котором она находилась в момент предыдущего завершения работы. В ходе работы системы, получая от проектировщика управляющие сигналы, монитор выполняет интерпретацию и контроль команд на выполнение проектных процедур и операций и передает команды функциональным и обеспечивающим подсистемам (например, команды ввода и корректировки исходных данных, манипулирования компонентами решений – добавления-удаления УК, КПД, маршрутов, изменения пропускных способностей УК и КПД с помощью средств «ручного» манипулирования; команды запуска процедур решения оптимизационных проектных задач – построения топологии, выбора маршрутов и пропускных способностей; команды формирования вариантов проектных решений и т. д.). Монитор также обеспечивает контроль допустимости выполнения проектных операций для каждого состояния проектируемого объекта; управление взаимодействием функциональных и обеспечивающих подсистем; общее управление ресурсами системы в процессе проектирования; сбор протокола процесса проектирования.

Подсистема поддержки работы с вариантами проектных решений обеспечивает хранение вариантов проектов, управление последовательностью их формирования, контроль за этой последовательностью, ведение списков вариантов проектов.

Подсистема управления данными обеспечивает сопровождение нормативно-справочной информации, информационное обслуживание пользователей.

Интерфейс «проектировщик – система» обеспечивается с помощью подсистемы графического отображения и подсистемы средств взаимодействия.

Подсистема графического отображения (ГРОТ) представляет собой многооконную систему визуализации проектируемых сетей в различных типовых формах.

Подсистема осуществляет отображение топологии СПД, маршрутов передачи данных, а также основных характеристик компонентов сетей (пропускных способностей, потоков, задержек для УК и КПД) и сети в целом (например, общей стоимости, суммарной длины каналов связи и т. д.) во время выполнения проектных процедур.

Подсистема средств взаимодействия (ПСВ) обеспечивает поддержку интерфейса с пользователем (проектировщиком) и предназначена для интерактивного управления процессом проектирования. С помощью этой подсистемы осуществляется доступ к настройкам системы, к средствам ввода исходных данных и параметров проектирования. Подсистема обеспечивает прием входных данных и команд от проектировщика и передачу их через монитор к соответствующим функциональным или обеспечивающим подсистемам. Кроме того, ПСВ обеспечивает справочный режим работы, а также возможность активного проведения процесса проектирования пользователями с различным уровнем подготовки.

Summary

V.M. Gostev. The system for optimization of data transmission networks design.

The problem of the data transmission networks (DTN) design is analysed. Methods and technologies of structural and parametric synthesis of DTN on the base of the system for optimization of designing are considered. Description of the architecture of the system is given.

Литература

1. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
2. *Блэк Ю.* Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. – М.: Мир, 1990. – 506 с.
3. *Дэвис Д., Барбер Д., Прайс У., Соломонидес С.* Вычислительные сети и сетевые протоколы. – М.: Мир, 1982. – 564 с.
4. *Аничкин С.А., Белов С.А., Бернштейн А.В. и др.* Протоколы информационно-вычислительных сетей / Под ред. И.А. Мизина, А.П. Кулешова. – М.: Радио и связь, 1990. – 504 с.
5. *Якубайтис Э.А.* Открытые информационные сети. – М.: Радио и связь, 1991. – 208 с.
6. *Янбых Г.Ф., Столляров Б.А.* Оптимизация информационно-вычислительных сетей. – М.: Радио и связь, 1987. – 232 с.
7. *Клейнрок Л.* Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
8. *Gerla M., Kleinrock L.* On the Topological Design of Distributed Computer Networks // IEEE Trans. on Commun. – 1977. – V. 25, No 1. – P. 48–60.
9. *Yaged B., Jr.* Minimum Cost Routing for Static Network Models // Networks. – 1971. – V. 1. – P. 139–172.
10. *Gerla M.* The Design of Store-And-Forward (S/F) Networks for Computer Communications. – Engeneering Report UCLA-ENG-7319. – Los Angeles: Univ. of California, 1973.
11. *Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В.* Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – Киев: Техніка, 1986. – 168 с.
12. *Джерла М.* Маршрутизация и управление потоком // Протоколы и методы управления в сетях передачи данных. – М.: Радио и связь, 1985. – С. 128–178.
13. *Шварц М.* Сети ЭВМ. Анализ и проектирование. – М.: Радио и связь, 1981. – 336 с.
14. *Gerla M., Frank H., Chou W., Eckl J.* A Cut-Saturation Algorithm for Topological Design of Packet-Switched Communications Networks // Proc. of the IEEE National Telecomm. Conf., San Diego, Dec. 2–4, 1974. – P. 1074–1085.

15. *Жохжикашвили В.А., Вишневский В.М.* Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 192 с.
16. *Вишневский В.М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
17. *Максименков А.В., Селезнев М.Л.* Основы проектирования информационно-вычислительных систем и сетей ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1991. – 320 с.
18. *Гостев В.М., Хабибуллин Р.Ф.* Учебно-исследовательская САПР сетей телебработки данных СЕЛЕНА // Исслед. по прикл. математике. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1992. – Вып. 19. – С. 14–23.
19. *Гостев В.М.* Подсистема графического отображения информации учебно-исследовательской САПР сетей телебработки данных СЕЛЕНА // Исслед. по прикл. математике. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1992. – Вып. 19. – С. 9–14.
20. *Хабибуллин Р.Ф.* О концептуальных основах и архитектуре систем поддержки выработки решений // Исслед. по информатике. – Казань: Отечество, 1999. – Вып. 1. – С. 121–144.
21. *Гостев В.М., Хабибуллин Р.Ф.* Технологии оптимизации проектирования сетей передачи данных территориальных компьютерных сетей // Исслед. по информатике.– Казань: Отечество, 1999. – Вып. 1. – С. 157–174.
22. *Гостев В.М., Хабибуллин Р.Ф.* О некоторых моделях и методах оценки временных характеристик сетей передачи данных территориальных компьютерных сетей // Исслед. по информатике. – Казань: Отечество, 2000. – Вып. 2. – С. 133–142.
23. *Морозов А.А., Гостев В.М., Хабибуллин Р.Ф.* Вычислительные эксперименты по оценке пропускных способностей и временных характеристик сетей передачи данных // Исслед. по информатике. – Казань: Отечество, 2001. – Вып. 3. – С. 149–164.
24. *Гостев В.М., Хабибуллин Р.Ф.* Об оптимальном выборе пропускных способностей каналов и узлов сетей передачи данных // Исслед. по информатике. – Казань: Отечество, 2005. – Вып. 9. – С. 103–116.
25. *Гостев В.М.* Система оптимизации проектирования сетей передачи данных как технологическая основа учебно-методического комплекса // Телематика-2005: Тр. XII Всерос. науч.-методич. конф., Санкт-Петербург, 6–9 июня 2005 г. – СПб., 2005. – Т. I. С. 237–238.
26. *Гостев В.М.* Учебно-исследовательская САПР информационных компьютерных сетей как средство повышения эффективности и качества образовательного процесса // Телематика-2007: Тр. XIV Всерос. науч.-методич. конф., Санкт-Петербург, 18–21 июня 2007 г. – СПб., 2007. – Т. I. – С. 135–136.
27. *Гостев В.М.* Математические модели и методы оценки характеристик магистральной коммуникационной инфраструктуры единой информационной образовательной среды региона // Телематика-2007: Тр. XIV Всерос. науч.-методич. конф., Санкт-Петербург, 18–21 июня 2007 г. – СПб., 2007. – Т. I. – С. 26–27.

Поступила в редакцию
10.07.07

Гостев Вадим Михайлович – старший преподаватель кафедры системного анализа и информационных технологий Казанского государственного университета.

E-mail: *gvtm@ksu.ru*