ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

В.М. Гостев, Р.Ф. Хабибуллин

В работе рассматривается проблема проектирования сетей передачи данных (СПД) территориальных компьютерных сетей (ТКС). Рассматриваются известные методы и технологии оптимизации решения этой проблемы и их особенности. Предлагается новая интерактивная технология оптимизации проектирования СПД ТКС.

Территориальная компьютерная сеть – глобальная, региональная или корпоративная – представляет собой ассоциацию территориально рассредоточенных вычислительных комплексов (ВК) различного типа и назначения, взаимодействующих друг с другом через коммуникационную подсеть – сеть передачи данных – 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 - 5]). Вычислительные комплексы, выполняющие функции серверов или рабочих станций, при взаимодействии друг с другом выступают как абоненты СПД. В качестве абонентов СПД выступают также локальные, корпоративные или региональные компьютерные сети, входящие в состав ТКС. СПД объединяет в единое целое своих абонентов, обеспечивая их взаимодействие на основе сетевых протоколов (см., например, [1, 2, 5]). Таким образом, СПД образует основу (аппаратно-программное ядро) любой ТКС.

Компонентами физической структуры СПД являются коммуникационные комплексы – узлы коммутации (УК) и магистральные каналы передачи данных (КПД), обеспечивающие физическое соединение УК между собой и их взаимодействие друг с другом. Узлы коммутации осуществляют управление процессами передачи потоков данных между абонентами, в частности, их маршрутизацию в сети, и реализуются обычно на базе высокопроизводительных многопротокольных маршрутизаторов [6]. Магистральные КПД создаются на базе систем связи общего назначения, например, на базе выделенных (некоммутируемых) телефонных каналов, каналов цифровых сетей связи, либо специализированных систем передачи данных. В качестве линий связи могут использоваться кабельные, волоконно-оптические, радиорелейные или спутниковые линии связи.

Концептуальной основой организации и функционирования современных СПД ТКС является технология коммутации пакетов [1, 2, 5]. Абоненты СПД обмениваются между собой сообщениями – информационными блоками произвольной длины. Сообщения, поступающие от абонентов, разбиваются на пакеты – блоки фиксированной длины. Пакеты нумеруются, снабжаются адресом получателя и передаются по СПД. Размеры пакетов обычно регламентируются в соответствующих протоколах.

Будем рассматривать проблему проектирования СПД ТКС в следующей постановке. Заданы места возможного размещения узлов коммутации СПД (маршрутизаторов), известны количество и существенные характеристики абонентских ВК (в том числе локальных и корпоративных сетей), подключаемых к каждому УК, и примерная интенсивность трафика (ожидаемая или та, которую желательно обеспечить) по передаче и приему, определена доступная номенклатура аппаратных средств (маршрутизаторы, модемы, адаптеры и т.д.) и их технические характеристики, а также доступные каналы связи между возможными пунктами размещения УК и их характеристики. Необходимо определить:

- количество и места размещения узлов коммутации СПД;
- совокупность протоколов, которые будут поддерживаться в СПД, а также, если это необходимо, параметры протоколов (в частности, размер пакета);
- тип и модель маршрутизатора, размещаемого в каждом УК, для обеспечения подключения всех абонентов СПД и их эффективного обслуживания;
- топологию каналов связи СПД, т.е. какие узлы коммутации будут непосредственно соединены каналами передачи данных из числа доступных;
- тип и параметры каждого канала передачи данных и аппаратуры, устанавливаемой на нем, определяющие его стоимостные характеристики и пропускную способность;
- основные маршруты передачи данных между узлами СПД по методу фиксированной однопутевой маршрутизации.

При этом должно быть обеспечено выполнение следующих условий и ограничений :

- обеспечение эффективного подключения всех существующих и ожидаемых абонентских ВК к СПД и необходимый резерв по подключениям;
- обеспечение совместимости всех компонентов аппаратуры по стандартам, интерфейсам и протоколам;
- обеспечение согласованности взаимодействий по протоколам всех компонентов СПД и поддержка необходимых протоколов передачи данных (как сетевого, транспортного, канального, физического уровней, так и протоколов обмена информацией между УК о конфигурации сети.

Основными критериями, по которым оценивается проект СПД, являются следующие :

- стоимостные характеристики, включающие капитальные затраты на оборудование узлов коммутации и линий связи, а также подключение или прокладку линий связи, и эксплуатационные расходы (стоимость аренды каналов связи); в качестве интегральной характеристики может быть взята приведенная стоимость;

- ожидаемые временные характеристики передачи данных по сети - среднее и максимальное время задержки сообщений и пакетов в СПД, определяющие время реакции (обслуживания запросов абонентов).

Кроме этих важнейших характеристик, которые могут быть вычислены и оценены для конкретного проекта, важными являются также такие трудноформализуемые и потому трудно измеримые, но вполне идентифицируемые качественные показатели, как надежность обеспечения передачи данных без потерь и искажения, определяемая надежностью аппаратуры и программного обеспечения УК и КПД, надежностью линий связи, используемыми протоколами, наличием в топологии сети дополнительных путей передачи данных, низкими вероятностью блокировки и вероятностью получения отказа в обслуживании и др.; расширяемость и масштабируемость СПД; общая производительность и пропускная способность СПД; возможность организации эффективного администрирования сети; возможность и степень эффективности процессов эксплуатации и технического сопровождения программно-аппаратных средств фирмами-изготовителями, провайдерами сетевых услуг, фирмами, предоставляющими услуги связи; ориентация на определенные классы аппаратных и программных средств и другие. Проектировщик стремится также учесть и будущую динамику развития сети, по которой у него есть определенные представления и наметки, поэтапность ввода в эксплуатацию, удовлетворение будущих потребностей.

Обозначим через V_0 заданное множество возможных мест размещения узлов коммутации СПД, через U_0 – множество доступных каналов связи между узлами коммутации, т.е. $(v,w) \in U_0$ тогда и только тогда, когда между пунктами v, $w \in V_0$ существует возможность непосредственного соединения с помощью линии связи. Таким образом, граф $G_0 = (V_0, U_0)$ представляет собой граф возможных мест размещения узлов коммутации и их возможных соединений с помощью каналов передачи данных.

Топология связи проектируемой СПД задается графом $G = (V, U)$, где множество вершин $V = \{v_1, ..., v_n\} \subset V_0$ определяет множество узлов коммутации СПД, множество ребер $U \subset U_0$ определяет множество каналов передачи данных, т.е. $(v_i, v_j) \in U$ тогда и только тогда, когда узлы комму-

тации $v_i, v_j \in V$ непосредственно соединены каналом передачи данных. Выбор типа КПД $(v_i, v_j) \in U$ и аппаратуры, устанавливаемой на нем, определяет его пропускную способность и стоимость. В общем случае будем считать, что КПД (v_i, v_j) с пропускной способностью s будет иметь стоимость $g_{ij}(s)$. На практике s может принимать значения из дискретного ряда, определяемого стандартами. Если пронумеровать ребра множества U, т.е. $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_m\}$, то пропускную способность КПД $u_k \in U$ будем обозначать через c_k, а его стоимость – через $g_k(c_k)$, $k = \overline{1,m}$ (здесь $g_k(s) = g_{ij}(s)$ при $u_k = (v_i, v_j)$).

Таким образом, общая проблема проектирования СПД состоит в выборе мест размещения узлов коммутации $V \subset V_0$, протоколов, маршрутизаторов, устанавливаемых в узлах коммутации, и топологии каналов передачи данных U, а также пропускных способностей $c = (c_1, \ldots, c_m)$ и маршрутов передачи данных (распределения потоков) по сети.

Существующие методы оптимизации проектирования СПД

Для комплексного решения общей проблемы проектирования предложены различные методы и технологии. В классической работе [7] проблема проектирования СПД решается при следующих предположениях:

П1. Все узлы коммутации (УК) являются абсолютно надежными. Время обработки в них пренебрежимо мало. Объем памяти в УК не ограничен.

П2. Все каналы передачи данных (КПД) свободны от ошибок (являются бесшумными и абсолютно надежными). Время распространения сигнала в КПД пренебрежимо мало. Пропускные способности КПД могут иметь любые неотрицательные значения.

П3. Трафик между v_i и v_j, поступающий в СПД из внешних источников, представляет собой пуассоновский процесс со средним значением γ_{ij} сообщений в секунду. Служебный трафик (трафик управляющих сообщений, генерируемый внутри СПД) не учитывается.

П4. Длины всех сообщений распределены по экспоненциальному закону со средним значением $1/\mu$ бит.

П5. В СПД используется фиксированная маршрутизация.

Ї6. «Предположение о независимости». При поступлении сообщения в очередной УК каждый раз заново случайным образом выбирается его новая длина согласно экспоненциальному распределению с плотностью вероятности $f(x) = \mu e^{-\mu x}$.

Как показано в [7], если заданы топология СПД, представленная графом $G=(V,U)$, где $V=\{v_1,...,v_n\}$ и $U=\{u_1,...,u_m\}$, пропускные способности каналов передачи данных c_k, $k=\overline{1,m}$, и интенсивности потоков λ_k, $k=\overline{1,m}$, то при указанных предположениях П1–П6 средняя задержка сообщений T_k в канале $u_k \in U$ вычисляется следующим образом :

$$T_k = \frac{1}{\mu c_k - \lambda_k}, \tag{1}$$

а средняя задержка сообщений в СПД равна

$$T = \frac{1}{\gamma}\sum_{k=1}^{m}\frac{\lambda_k}{\mu c_k - \lambda_k}$$

(здесь $\gamma = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\gamma_{ij}$ – суммарный трафик по сети), или, с использованием обозначения $f_k = \lambda_k / \mu$,

$$T = \frac{1}{\gamma}\sum_{k=1}^{m}\frac{f_k}{c_k - f_k} \ . \tag{2}$$

При этих предположениях в [7, 8] проблема проектирования СПД ставится следующим образом. Заданы множество УК $V=\{v_1,...,v_n\}$, симметричная матрица нагрузки $\Gamma = (\gamma_{ij})$ и функции $g_{ij}(s)$ зависимости стоимости каналов передачи данных $(v_i, v_j) \in U_0$, $v_i, v_j \in V$, от их пропускной способности s, ограничение средней задержки заданной величиной T_0. Найти такие множество ребер $U=\{u_1,...,u_m\} \subset U_0$, описывающее топологическую структуру СПД, пропускные способности $c=(c_1, ..., c_m)$ соответствующих КПД и (симметричное) распределение потоков $f=(f_1, ..., f_m)$, передаваемых по КПД, соответствующее матрице нагрузки $\Gamma=(\gamma_{ij})$, которые минимизируют суммарную стоимость

$$D(c,f) = \sum_{k=1}^{m} g_k(c_k) \tag{3}$$

при условиях :

$f_k < c_k$, $k=\overline{1,m}$, (условие реализуемости потока), (4)

$\frac{1}{\gamma}\sum_{k=1}^{m}\frac{f_k}{c_k - f_k} \le T_0$ (ограничение на величину средней задержки), (5)

и обеспечении заданной степени связности графа $G=(V,U)$. Здесь $g_k(s) = g_{ij}(s)$ при $u_k = (v_i, v_j)$.

Для решения этой задачи наиболее известным и обоснованным является так называемый ***вогнутый метод удаления ребер*** (ВМУР; Concave Branch Elimination Method [7 - 10], см. также [1, 11]), общая схема которого для линейных функций стоимости $g_k(s) = d_k s + h_k$, $k = \overline{1,m}$, состоит в следующем.

1. Некоторым образом задается исходная топология $G = (V, U)$ в виде полносвязного или сильносвязного графа.

2.Решается задача выбора пропускных способностей (ПС) $c = (c_1, \ldots, c_m)$ и распределения потоков (РП), т.е. выбора $f = (f_1, \ldots, f_m)$, следующим образом.

а) Выбирается начальный поток f^0, соответствующий матрице нагрузки, и полагается $f = f^0$.

б) Рассчитываются величины пропускных способностей

$$c_k = f_k + \frac{\sum_{l=1}^{m} \sqrt{d_l f_l}}{\gamma T_0} \sqrt{\frac{f_k}{d_k}}, \; k = \overline{1,m}, \tag{6}$$

и суммарная стоимость

$$D(f) = \sum_{k=1}^{m} \left(d_k f_k + \frac{1}{\gamma T_0} \left(\sum_{l=1}^{m} \sqrt{d_l f_l} \right)^2 \right). \tag{7}$$

в) Вычисляются веса ребер

$$l_k = \frac{\partial D}{\partial f_k} = d_k \left(1 + \frac{1}{\gamma T_0 \sqrt{d_k f_k}} \sum_{l=1}^{m} \sqrt{d_l f_l} \right), \; k = \overline{1,m},$$

и находятся потоки $\varphi = (\varphi_1, \ldots, \varphi_m)$ по каналам (соответствующие матрице нагрузки) в результате распределения внешних межузловых потоков γ_{ij} по кратчайшим путям, определяемым вычисленными весами ребер.

г) Если $D(\varphi) < D(f)$, то полагается $f = \varphi$ и осуществляется переход на п. б). В противном случае – переход на п. 3.

3. Ребра графа, для которых $f_k = 0$, удаляются, если это не нарушает ограничения на связность. Полученные c_k, $k = \overline{1,m}$, округляются до ближайшего большего допустимого дискретного значения.

Сделаем некоторые замечания.

1. Выражения (6) для c_k получаются как точное решение задачи минимизации стоимости при линейных функциях стоимости $g_k(s) = d_k s + h_k$, заданном ограничении на величину средней задержки и заданных потоках f_k, $k = \overline{1,m}$. При этом суммарная стоимость выразится величиной (7), зависящей только от f. Если функции $g_k(s)$ не являются линейными, пред-

лагается использовать их линейную аппроксимацию в окрестности f_k (поскольку к моменту определения c_k потоки уже известны). В [7] также предлагаются варианты метода с использованием степенной и логарифмической аппроксимаций функций $g_k(s)$.

2. Метод, используемый на этапе 2, решает исходную задачу (которая в общем случае является многоэкстремальной) при фиксированной топологии, и, как показано, например, в [12], сходится и дает в общем случае только локальный оптимум, зависящий от выбираемого начального потока f^0, поэтому авторы предлагают провести для одной и той же начальной топологии ряд расчетов с различными случайно выбираемыми начальными потоками 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.

3. В [8] для решения задачи выбора пропускных способностей и распределения потоков на втором этапе ВМУР в случае дискретных стоимостей каналов предлагается также следующий эвристический подход, названный MLA (Minimum Link Assignment – см. также [13]). На втором этапе ВМУР делается следующее :

а) Распределение потоков по алгоритму минимального числа каналов: для каждой пары узлов $v_i, v_j \in V$ находится кратчайший по числу промежуточных узлов (т.е. с минимальным числом ребер) путь между ними, и поток γ_{ij} направляется по этому пути.

б) Для каждого канала $u_k \in U$, $k = \overline{1,m}$, выбирается наименьшая допустимая пропускная способность $c_k > f_k$ и вычисляется $D(f) = \sum_{k=1}^{m} g_k(c_k)$.

Пункт в) остается без изменений, а в п. г) определяются c'_k по тому же правилу для потока φ , т.е. $c'_k > \varphi_k$ и вычисляется $D(\varphi) = \sum_{k=1}^{m} g_k(c'_k)$. Если $D(\varphi) < D(f)$, то полагается $f = \varphi$ и осуществляется переход на пункт в). В противном случае – переход к этапу 3.

Следует заметить, что по сравнению с ВМУР здесь другая, менее обоснованная процедура выбора пропускных способностей и распределения потоков.

В работе [14] для решения рассматриваемой задачи предложен ***метод насыщения сечений*** (Cut-Saturation Method — CSM) - см. также [1, 7, 8, 12, 15]).

Ядром метода насыщения сечений (НС) является алгоритм маршрутизации, в качестве которого используется так называемый метод отклонения потока (см. [7, 8, 15]), обеспечивающий для заданной матрицы нагрузки, заданных топологии СПД и пропускных способностей каналов распределение потоков в каналах передачи данных, минимизирующее среднюю временную задержку (2) в сети.

В основе метода НС лежит понятие «насыщенного сечения». Сечение – это множество ребер (каналов), удаление которых нарушает связность графа СПД (разбивает граф на две несвязные части). Сечение, включающее самые загруженные каналы, называется насыщенным.

Общая схема метода НС состоит в следующем.

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

2. Методом отклонения потока (ОП) решается задача отыскания распределения потоков $f=(f_1, ..., f_m)$, минимизирующего среднюю временную задержку (2).

3. КПД упорядочиваются по величине загрузки $\rho_k = f_k / c_k$ $, k=\overline{1,m}$. Определяются насыщенное сечение и наименее загруженные каналы.

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

Для выбора включаемых и исключаемых каналов в методе НС в [12, 14] предложен ряд эвристических плохо формализуемых и формальных приемов, которыми может руководствоваться проектировщик, например, так называемые эмпирические правила «двух шагов» (критерий «дистанция 2») и «разрушения цепи». Однако предполагается, что окончательные решения принимает сам проектировщик.

Таким образом, метод насыщения сечений представляет собой, по сути, итеративную человеко-машинную технологию формирования проекта СПД минимальной стоимости при ограничениях на среднюю задержку сообщений и связность сети. При этом метод НС ориентирован на использование опыта и интуиции проектировщика. Например, в [1] говорится: «Опытный разработчик обычно умеет находить такие варианты топологии сети, которые оказываются значительно лучше вариантов, найденных с

помощью какой-либо простой программы, поэтому одним из наиболее мощных инструментов разработки топологии является сочетание метода насыщения сечений с интуицией разработчика, время от времени корректирующего работу программы».

В работе [11] предложен метод групповой оптимизации, являющийся одной из возможных полных алгоритмических формализаций метода насыщения сечений (см. также [16]). В нем строго определены алгоритм выбора начальной топологии и пропускных способностей, алгоритм определения ребер-кандидатов на удаление и правило выбора удаляемых ребер, алгоритм определения ребер-кандидатов на включение в топологическую структуру проектируемой СПД и правило выбора включаемых ребер из числа кандидатов. В качестве базового метода оптимального распределения потоков используется метод отклонения потока (ОП), предложена также модификация метода ОП и эвристический метод выбора пропускных способностей и распределения потоков, учитывающий возможность выбора пропускных способностей каналов из дискретного ряда значений. Естественно, поскольку метод эвристический, оптимальный результат не гарантируется.

В этой же работе предложен относительно простой итеративный метод, названный методом М-структур, общая схема которого состоит в следующем. На начальном этапе по специальному алгоритму осуществляется выбор начальной избыточной топологии сети, для которой затем решается задача распределения потоков и выбора пропускных способностей, минимизирующих стоимость сети при условии выполнения заданного ограничения на величину средней задержки (2). Затем выполняются последовательные итерации, на каждой из которых выполняются следующие действия.

Путем последовательного перебора в определенном порядке вершин (узлов) сети и инцидентных им ребер (каналов) выполняется поиск избыточного ребра, удаление которого не нарушает ограничений по связности сети, и осуществляется его пробное удаление. Далее, с использованием базового или модифицированного метода отклонения потока осуществляется перераспределение потоков (коррекция маршрутов) и выбор оптимальных пропускных способностей каналов при условии, что средняя задержка не превосходит заданной величины. Если стоимость полученного варианта сети уменьшилась по сравнению с предыдущим, то удаление ребра фиксируется и осуществляется переход на следующую итерацию. Если же улучшения при удалении ребра не произошло, то ребро восстанавливается, осуществляется возврат к предыдущему варианту проекта, и продолжается перебор в поисках следующего избыточного ребра. Если на некоторой итерации все ребра просмотрены, и удаление ни одного из них не приводит к улучшению результата (стоимости), работа метода завершается.

Близкий по схеме к методу М-структур итеративный метод последовательного удаления ребер предложен в работе [17]. В этом методе на начальном этапе в качестве исходной топологии СПД берется полносвязный граф, распределение потоков осуществляется по путям минимальной длины, пропускные способности каналов выбираются минимально возможными из дискретного ряда значений, т.е. для ребра $u_k \in U$ выбирается $c_k > f_k$, а в качестве кандидатов на удаление последовательно пробуются минимально загруженные ребра.

В работе [18] для решения комплексной задачи проектирования СПД ТКС предложен комбинаторный метод, основанный на полном переборе (перечислении) всех допустимых по условию связности топологий, решении для каждой из них задачи оптимального распределения потоков и выбора пропускных способностей, минимизирующих стоимость при ограничении на величину средней задержки, 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 [19], которые ориентированы на получение одинакового, равного для всех каналов коэффициента нагрузки, и могут быть полезны для проектирования подсистемы СПД, основанной на магистральных цифровых каналах.

Интерактивная технология оптимизации проектирования СПД

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 крупных проектов, таких как ARPA, «Сирена», сеть ВЦКП УССР и др. Однако трудно надеяться на то, что какой-либо из них или даже все они вместе дадут возможность разработать качественный проект СПД, подходящий для практического использования в современных условиях.

Дело в том, что большинство этих методов направлено на решение одной и той же задачи - минимизации стоимости СПД. Другой важный критерий - средняя задержка сообщений по сети - учитывается только в виде ограничения, что затрудняет поиск эффективного баланса между этими противоречащими друг другу критериями. Сама величина средней задержки (2) обоснована только при нереалистичных предположениях П1 - П6. При этом не учитывается пакетная структура сообщений и задержки в узлах коммутации. Ни один из методов никак не учитывает требование минимизации максимальной задержки сообщений (пакетов). Рассмотрен-

ные методы не позволяют также учитывать многочисленные плохо формализуемые факторы (в частности, особенности используемых в сети протоколов). Наконец, к сожалению, рассматриваемые методы практически непригодны для решения задач проектирования СПД при несимметричной нагрузке, что типично для современных условий, когда в компьютерной сети выделяются специализированные серверы обработки и баз данных.

Таким образом, необходимы новые методы и средства проектирования СПД, которые позволяли бы проводить оптимизацию проекта при более полном учете всех важнейших критериев оценки качества проектируемой сети, всех основных особенностей современных компьютерных сетей и требований, предъявляемых к ним (в том числе многочисленных плохо формализуемых требований), которые давали бы возможность учитывать и использовать все особенности и условия реализации конкретного проекта.

Представляется, что справиться со сложностью проблемы проектирования СПД может помочь интерактивная человеко-машинная технология, в которой ведущая роль в процессе проектирования СПД принадлежит опытному проектировщику. Именно он, основываясь на своем опыте, на своем знании особенностей построения и функционирования компьютерных сетей, на своем понимании ситуации и ее перспектив вырабатывает проектные решения и варианты проекта, стремясь учесть во всей возможной полноте требования к СПД и особенности реальной ситуации. Поскольку эти требования и условия противоречивы, часто плохо формализуемы, проявляются по-разному, то только опытный проектировщик может найти разумные компромиссы. Компьютерная система используется проектировщиком для проведения расчетов и решения других формализованных задач - частных задач проектирования, задач формирования вариантов проектных решений, их оценки и сравнения. Она также должна предоставить проектировщику максимальные возможности в проведении процесса проектирования, обеспечивая его полную и качественную поддержку.

Один из возможных подходов к преодолению сложности состоит в том, чтобы разложить проблему проектирования СПД на отдельные части, т.е. осуществить ее декомпозицию на совокупность подпроблем, и развернуть процесс их решения во времени в виде последовательности этапов. Решение первой подпроблемы, определяя и фиксируя какие-то компоненты решения общей проблемы, одновременно определяет основу и исходные данные в следующей подпроблеме, и можно приступать к ее решению. В свою очередь, любое возможное решение этой подпроблемы определяет и фиксирует значения других компонент общего решения, что делает более определенной следующую подпроблему и т.д. Путем такой вертикальной многослойной декомпозиции [21] осуществляется сведение сложной проблемы к совокупности локальных, относительно самостоятельных и

менее связанных подпроблем, согласованное решение которых дает решение исходной проблемы.

На начальном этапе процесса проектирования СПД осуществляется выбор мест размещения узлов коммутации СПД, типов устанавливаемых в них маршрутизаторов, а также используемых в СПД протоколов и их параметров. Таким образом, здесь принимаются самые принципиальные решения, определяющие лицо не только проектируемой сети передачи данных, но и всей территориальной компьютерной сети в целом. Это самый трудный и трудноформализуемый этап. Однако, несмотря на большое разнообразие оборудования для узлов коммутации и используемых протоколов, если учесть характер, расположение и выполняемые функции уже имеющихся сегментов и компонентов, объединяемых в компьютерную сеть, предполагаемые объемы данных, которыми они будут обмениваться после объединения и в перспективе, общие качественные требования к создаваемой территориальной компьютерной сети и ее сети передачи данных и предполагаемый характер ее развития, то обычно в каждом конкретном случае остается не так много приемлемых основных вариантов, из которых необходимо осуществить выбор. Конкретные реальные условия почти полностью определяют многие принимаемые здесь решения. Поэтому различные варианты выбора мест размещения УК и протоколов можно рассматривать как основу концептуально различных проектов ТКС и разрабатывать их в отдельности, как отдельные проекты, из которых в дальнейшем будет сделан окончательный выбор.

Будем считать, что для конкретного разрабатываемого проекта СПД ТКС основные решения по выбору мест размещения УК (множества $V \subset V_0$) и используемым протоколам приняты, хотя и возможны некоторые вариации уточняющего характера, не изменяющие принципиально проект СПД, такие, например, как включение дополнительного или исключение какого-либо имеющегося узла коммутации, установка в УК другого маршрутизатора из выбранного ряда, изменение размера пакета и т.д. Тогда для решения проблемы проектирования СПД ТКС необходимо решить следующую совокупность подпроблем:

1. Выбор топологической структуры СПД, т.е. способа соединения узлов коммутации с помощью каналов передачи данных.

2. Выбор основных маршрутов передачи данных между каждой парой узлов коммутации.

3. Выбор пропускных способностей каналов передачи данных.

Несмотря на то, что перечисленные подпроблемы являются взаимосвязанными и только в совокупности их решение дает решение общей проблемы, они могут решаться в указанной последовательности относительно независимо друг от друга. При решении каждой подпроблемы проектировщик может сосредоточиться прежде всего на соответствующих

частных аспектах общей проблемы и применять методы и технологии для ее эффективного решения.

На первом этапе требуется выбрать потенциально наиболее эффективную топологическую конфигурацию сети. Проблема здесь состоит в том, чтобы, с одной стороны, получить необходимое количество путей передачи данных между узлами коммутации для обеспечения надежности функционирования сети и возможности снижения временных задержек при передаче данных, а с другой стороны, не допустить чрезмерного роста той части стоимости сети, которая определяется количеством используемых линий связи, их качественными характеристиками и общей длиной, т.е. обеспечить баланс между этими противоречащими друг другу целями. Для проектировщика могут представлять интерес топологическая структура сети минимальной стоимости и структура, обеспечивающая заданное количество путей между каждой парой УК. Эти варианты топологии могут быть получены с помощью решения соответствующих задач и могут дать проектировщику ценную информацию о конкретной ситуации, а также послужить основой для дальнейшей работы. Часто у проектировщика имеются (или возникают впоследствии) более или менее веские соображения в пользу включения в сеть тех или других каналов связи из числа доступных. Может иметь смысл, задав частичную топологию, с помощью формализованного метода достроить ее, обеспечивая при этом, например, нужную степень связности сети при минимальном росте стоимости, или, имея вариант топологии сети, с помощью другого метода улучшить его по тем или другим параметрам. При анализе получающихся вариантов топологии, может иметь смысл попробовать изменить их, с тем чтобы оценить, как это скажется на важных формализованных и плохо формализуемых характеристиках. Таким образом, большую помощь проектировщику на этом этапе могут оказать формализованные методы, позволяющие построить начальный вариант топологии сети с теми или другими заданными свойствами, достроить имеющийся у проектировщика частичный вариант до полного в требуемом направлении, улучшить имеющийся вариант топологии по тем или другим показателям.

В результате выполнения первого этапа будет получен предварительный вариант топологической структуры СПД $U = \{u_1, ..., u_m\} \subset U_0$, который определяет возможные пути передачи данных между различными УК. Это служит основой для решения на следующем этапе проблемы эффективного распределения потоков данных, т.е. выбора основного маршрута передачи данных между каждой парой узлов коммутации СПД $v_i, v_j \in V$. Для достаточно развитой топологии сети проблема здесь состоит в том, что выбор маршрутов передачи данных определяет распределение нагрузки по каналам и узлам коммутации, а следовательно, и временные задержки в них

при передаче пакетов по сети. Неудачный выбор маршрутов может привести к большим задержкам в отдельных УК и каналах передачи данных и, как следствие, к чрезмерному росту задержек при передаче пакетов по сети. Однако на этом этапе задержки еще не могут контролироваться, поскольку не выбраны пропускные способности каналов, поэтому проектировщик может пока принять превентивные меры, выбирая, например, маршруты с минимальным количеством промежуточных УК, или маршруты минимальной физической длины. Проектировщику и здесь было бы полезно иметь возможность задать предпочтительность использования тех или других КПД на различных направлениях передачи данных, или даже прямо задать некоторые предпочтительные маршруты, а остальные доопределить (достроить) с помощью решения соответствующей задачи и при необходимости откорректировать.

Таким образом, на этом этапе на выбранную топологическую конфигурацию СПД “накладываются” информационные потоки и в результате будет получен некоторый вариант распределения потоков по сети, определяющий при предполагаемой нагрузке на сеть $\Gamma = (\gamma_{i,j})$ объемы потоков данных, передаваемых по каждому каналу $f = (f_1, ..., f_m)$ и через каждый узел коммутации.

Построенное распределение потоков служит основой для выбора на следующем этапе пропускных способностей КПД $c = (c_1, ..., c_m)$, т.е. выбора типа и состава оборудования, устанавливаемого на каждом канале с учетом ожидаемого потока по этому КПД. Использование более производительной аппаратуры на выделенном канале связи или цифровых каналов с большей пропускной способностью приводит к уменьшению временных задержек при передаче данных по этому каналу. Однако, это означает также увеличение капитальных затрат или эксплуатационной составляющей стоимости СПД. Поэтому проектировщик должен иметь возможность с использованием формализованных методов построить и рассмотреть варианты выбора пропускных способностей, обеспечивающие, например, минимизацию стоимости при ограничении на величину временной задержки и минимизацию временной задержки при условии, что стоимость не превышает заданной величины. Проектировщик должен также иметь возможность откорректировать выбранный вариант или на его базе попытаться сформировать свой. Здесь также может оказаться полезным иметь возможность прямо задавать параметры выбранных им каналов, а остальные доопределять с помощью решения соответствующей задачи.

Только на этой стадии проектирования, после выбора пропускных способностей КПД, впервые будет получен полный вариант проекта СПД, и поэтому станет возможным оценить все его важнейшие характеристики, такие как капитальная и эксплуатационная составляющие стоимости СПД,

средняя и максимальная временные задержки при передаче пакета и сообщения по сети, а также составляющие надежности СПД. Трудно ожидать, что сформированный вариант проекта окажется приемлемым по всем этим параметрам, и скорее всего за счет выбора пропускных способностей каналов не удастся получить приемлемые значения характеристик всего проекта в целом, и прежде всего - временных задержек в рамках стоимостных ограничений. Поэтому проектировщик может вернуться к предыдущему этапу выбора основных маршрутов с тем, чтобы попытаться за счет их пересмотра и перераспределения потоков передачи данных улучшить временные характеристики сети.

Поскольку на этой стадии проектирования, при повторном решении проблемы маршрутизации, решения по выбору пропускных способностей КПД уже приняты, и определены оценки временных задержек на каждом КПД, появляется возможность ориентироваться на них и, например, попытаться построить с помощью формализованных методов те распределения потоков данных по сети, которые при заданных пропускных способностях КПД минимизируют среднюю или максимальную временные задержки. Представляет также интерес выбор маршрутов по кратчайшим путям, определяемым величинами задержек на каналах передачи данных и в узлах коммутации. Рассматривая эти варианты маршрутизации, оценивая и сравнивая их, а также пробуя их скорректировать, проектировщик вырабатывает новый вариант маршрутизации в СПД. Поскольку в нем происходит перераспределение потоков по сети, изменяются временные задержки на КПД и в узлах коммутации, требуется повторное выполнение этапа выбора пропускных способностей каналов для их пересмотра и уточнения.

Если и на этот раз не удается получить приемлемые и желательные характеристики проекта в целом, проектировщик снова может вернуться к пересмотру маршрутов и т.д. При необходимости, если например таким путем не удается получить необходимое соотношение между временными и стоимостными характеристиками, проектировщик может вернуться к этапу проектирования топологии СПД с тем, чтобы путем добавления дополнительных каналов передачи данных или исключения малоэффективных КПД попытаться изменить проект в лучшую сторону. Он может также, основываясь на достигнутом в процессе проектирования понимании особенностей ситуации и источников затруднений, выработать новый вариант топологической структуры СПД и осуществить его проработку, решая проблемы маршрутизации и выбора ПС.

Наконец, если проектировщик видит, что добиться желаемых результатов не удается, он может вернуться даже к начальному этапу и попытаться добиться своих целей за счет, например, добавления новых узлов коммутации или выбора других маршрутизаторов для установки в УК. Так, работая последовательно по этапам и при необходимости возвра-

щаясь к более ранним этапам, проектировщик вырабатывает и корректирует варианты проекта, пока не будет получен проект СПД, в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям и учитывающий возможности в конкретных условиях.

Таким образом, рассмотренная технология проектирования СПД основана на декомпозиции исходной сложной проблемы проектирования СПД на совокупность соответствующих частных подпроблем и представляет собой многоэтапный итеративный циклический процесс. Назовем ее Д-технологией.

Д-технология предусматривает последовательное осуществление этапов проектирования для решения соответствующих частных подпроблем, а затем, после оценки проекта в целом, возврат при необходимости на какой-либо из предыдущих этапов с тем, чтобы попытаться улучшить проект. Если попытки улучшения проекта на более поздних этапах не дают желаемого эффекта, осуществляется пересмотр проектных решений на более ранних этапах, более жестко, структурно определяющих проект, или даже выработка и рассмотрение другого структурного варианта проекта. Неоднократный возврат и повторение пройденных этапов на новом витке спирали позволяет провести последовательное взаимное согласование, сбалансирование и взаимоувязку решений частных подпроблем. В ходе итеративного решения общей проблемы у проектировщика происходит накопление знаний об условиях и особенностях решаемой проблемы, приходит лучшее понимание особенностей конкретного проекта, пределов достижимости целей и той цены, которую приходится платить за необходимый результат, которые позволяют выявить направления корректировки проектных решений. В ходе процесса выявляется взаимное влияние различных критериев и их соотношение, осуществляется шлифовка варианта проекта.

Возможен 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 также различные варианты реализации Д-технологии. В частности, технология вариантных расчетов на базе вогнутого метода удаления ребер (ВМУР), рассмотренная выше, является частным случаем Д-технологии, т.е. в рамках Д-технологии может быть реализовано, в частности, и применение ВМУР.

Для успешного применения рассмотренной технологии проектирования СПД и различных вариантов ее реализации требуется достаточно мощная компьютерная поддержка, включающая реализации формализованных методов решения частных задач оптимизации проектирования СПД – выбора топологической структуры, распределения потоков (маршрутизации), выбора пропускных способностей КПД - и оценки ее

характеристик. Для решения соответствующих задач оптимизации проектирования в различной постановке разработаны разнообразные методы (см. [1, 7 - 20]). Однако оказалось, что практически все разработанные методы пригодны только для формирования начального варианта решения и не трансформируются или трансформируются с большим трудом для использования в качестве достраивателей и улучшателей, особенно, если некоторые компоненты решения временно защищены от изменения. Кроме того, почти все они основаны на нереалистичной оценке средней временной задержки (2) и никак не учитывают максимальную временную задержку при передаче пакетов (сообщений) по сети. Поэтому для обеспечения поддержки рассмотренной технологии предложены новые постановки задач оценки временных характеристик сети и частных задач оптимизации проектных решений, более полно учитывающие современные требования и реалии, и разработаны новые методы их решения, пригодные для использования в качестве достраивателей и улучшателей..

Для реализации рассмотренных технологий, на основе концепции систем поддержки выработки решений (СПВР - см. [22, 23]) разработана архитектура системы оптимизации проектирования (СОПР) СПД ТКС. Определены структура и состав математического и программного обеспечения СОПР, включающие реализацию и поддержку всех пригодных для использования методов решения задач анализа и оптимизации проектирования СПД, как известных, так и специально разработанных. В настоящее время разрабатывается и создается базовое программное обеспечение СОПР СПД ТКС. Некоторые идеи и компоненты СОПР реализованы и опробованы в учебно-исследовательской САПР информационных компьютерных сетей, которая на протяжении ряда лет используется в учебном процессе факультета ВМК Казанского университета.

Литература

1. Вычислительные сети и сетевые протоколы /Д.Дэвис, Д.Барбер, У. Прайс, С. Соломонидес. - М. : Мир, 1982. - 564 с.

2. Якубайтис Э.А. Открытые информационные сети. - М.: Радио и связь, 1991. - 208 с.

3. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. - М. : Мир, 1989. - 544 с.

4. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. -М.: Мир, 1990. -506 с.

5. Протоколы информационно-вычислительных сетей : Справочник / С.А. Аничкин, С.А. Белов, А.В. Бернштейн и др.; Под ред. И.А. Мизина, А.П. Кулешова. - М.: Радио и связь, 1990. - 504 с.

6. Куракин Д.В., Сидоров С.Ф. Маршрутизаторы для глобальных телекоммуникационных сетей и реализуемые в них алгоритмы // Информационные технологии. - 1996. - N2. - С.29-34.

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.COM - 25. - N.1. - P.48-60.

9. Yaged B. Jr. Minimum Cost Routing for Static Network Models // Networks. - 1971. - Vol.1. - P.139 - 172.

10. Gerla M. The Design of Store-And-Forward (S/F) Networks for Computer Communications, University of California, Los Angeles, School of Engeneering and Applied Science, Engeneering Report UCLA-ENG-7319, 1973.

11. Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. - Киев: Техніка, 1986. - 168 с.

12. Шварц М. Сети ЭВМ. Анализ и проектирование. - М.: Радио и связь, 1981. - 336 с.

13. Frank H., Frisch I.T., Chou W. Topological Considerations in the Design of the ARPA Computer Network //AFIPS Conference Proceedings. - 1970. - Spring Joint Computer Conference. - Vol.36. - P.581-587.

14. Gerla M., Frank H., Chou W., Eckl J. A Cut-Saturation Algorithm for Topological Design of Packet-Switched Communications Networks //Proceedings of the IEEE National Telecommunications Conference, San Diego, California, December 2-4, 1974. -P. 1074-1085.

15. Джерла М. Маршрутизация и управление потоком // Протоколы и методы управления в сетях передачи данных / Под ред. Ф.Ф.Куо. - М.: Радио и связь, 1985. - 480 с.

16. Зайченко Ю.П. Задачи проектирования структуры распределенных вычислительных сетей // Автоматика. - 1981. - N4. - С.27-40.

17. Янбых Г.Ф., Столяров Б.А. Оптимизация информационно-вычислительных сетей. - М.: Радио и связь, 1987. - 232 с.

18. Жожикашвили В.А., Вишневский В.М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988. - 192 с.

19. Максименков А.В., Селезнев М.Л. Основы проектирования информационно-вычислительных систем и сетей ЭВМ. - М. : Радио и связь, 1991. - 320 с.

20. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. - 332 с.

21. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. - М.: Мир, 1973. - 344 с.

22. Хабибуллин Р.Ф. О концептуальных основах и архитектуре систем поддержки выработки решений // Инф. бюлл. Ассоц. мат. прогр. № 8. - Екатеринбург: УрО РАН, 1999. - С. 269 - 270.

23. Хабибуллин Р.Ф. Концептуальные основы и архитектура систем поддержки выработки решений // Наст. сборник.