

УДК 621.39

Князева Н.А., д.т.н. (Одесская государственная академия холода)

Верес И.В., аспирант (Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова)

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТРУКТУРЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

**Князева Н.О., Верес І.В. Методичні підходи визначення структури телекомунікаційної мережі.** Запропоновані методичні підходи, що дозволяють вирішити завдання визначення структури телекомунікаційної мережі для розподілу потоків вимог за критерієм гарантованої якості обслуговування.

**Ключові слова:** ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНІСТЬ, ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ

**Князева Н.А., Верес И.В. Методические подходы к определению структуры телекоммуникационной сети.** Предложены методические подходы к решению задачи определения структуры телекоммуникационной сети для распределения потоков требований по критерию гарантированного качества обслуживания.

**Ключевые слова:** ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ, ОПТИМАЛЬНОСТЬ, КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ

**Kniazeva N.O., Veres I.V. Methodical approaches determine the structure of the telecommunications network.** Methodical approaches which allow to solve a problem of definition of structure of a telecommunication network for distribution of streams of requirements by criterion of the guaranteed quality of service are offered

**Keywords:** TELECOMMUNICATION, OPTIMALITY, QUALITY OF SERVICE

Быстрая эволюция телекоммуникационных технологий, обеспечивающих предоставление широкого спектра современных услуг высокого качества, обуславливает необходимость совершенствования методов проектирования телекоммуникационных сетей (ТКС), что требует системного подхода к проектированию создаваемых систем. Важнейшим этапом проектирования является выделение в создаваемой системе подсистем и определение задач, требующих решения. Среди задач, требующих решения при переходе из аналогового в цифровой формат всех видов информации – речи, данных, видео – одной из важных является задача модернизации и оптимизации структуры существующей ТКС и связанная с ней задача распределения потоков требований в сети.

Сложность этой задачи состоит в существовании большого количества разнообразных моделей развития современных сетей, каждая из которых представляет точку зрения на один и тот же процесс с разных сторон (сетевая архитектура, внедрение и предоставление услуг и т.п.). Учитывая наличие широкого спектра перспективных технологий построения ТКС, существует довольно сложная организационно-техническая задача – определение оптимальной структуры ТКС на основании комплексной оценки технических показателей.

Сферы применения системных методов в отрасли связи отличаются степенью проникновения в них системных идей, выбором методов системных исследований. Теория исследования операций, теория графов наряду с концепциями системного подхода являются методологической основой проектирования оптимальных систем [1, 2].

При определении оптимальной структуры ТКС для раздачи программ цифрового эфирного вещания, мультимедийного трафика и других видов информации необходимо иметь единую системную идеологию, которая включает анализ, представление результатов, моделирование и оптимизацию. В итоге формируется оптимизированная система как единый объект с заданным целевым назначением.

Таким образом, определение оптимальной структуры ТКС необходимо осуществлять с использованием соответствующих методических подходов, математического моделирования, что позволяет иметь оптимальный структурный вариант ТКС для распределения нагрузки – программ цифрового эфирного вещания, разного рода мультимедийного трафика и др. Исходя из того, что сегодня одним из важнейших требований, предъявляемых к ТКС, являются требования к качеству обслуживания поступающих в сеть потоков, в данной работе предлагается осуществлять оптимизацию структуры ТКС по критерию гарантированного качества обслуживания потоков требований.

Под структурой любой системы понимают фиксированную совокупность элементов и связей между ними, которые мало изменяются при изменениях в системе и обеспечивают существование системы и ее основных свойств [1, 2].

Под структурой ТКС будем понимать совокупность ее элементов (пунктов сети) и линий связи между ними, обеспечивающих основные свойства системы – ТКС: распределение потоков требований в соответствии характеристиками ТКС, важнейшей из которых является пропускная способность линий связи.

Представим математическую модель задачи оптимизации структуры ТКС как задачу математического программирования. Математическая модель сети представляется в виде связного конечного ориентированного графа  $G=(A, B)$ , где  $A$  – множество вершин графа, поставленное в соответствие множеству пунктов  $i$  сети ( $i = \overline{1, n}$ );  $B$  – множество ребер графа, поставленное в соответствие множеству ветвей  $\beta_{xy}$  сети. Отметим, что ветви  $\beta_{xy}$  – это те линии связи, которые могут быть введены в ТКС, и задача состоит в том, чтобы определить необходимость их использования в соответствии с их загрузкой  $f_{xy}$ , которая формируется на основе получения оптимального плана распределения потоков требований в сети.

Между всеми (или некоторыми) парами пунктов  $i$  и  $j$  сети  $i \neq j$  (имеется поток требований  $\Phi_{ij}$ , выраженный в требуемой пропускной способности тракта передачи, используемого для раздачи программ цифрового эфирного вещания, мультимедийного трафика и др. Для распределения каждого потока требований в сети определяются пути  $\mu_{ij}^v$  ( $\mu_{ij}^v \in \mu_{ij}$ ), где  $\mu_{ij}$  – множество возможных путей распределения потока требований  $\Phi_{ij}$ ;  $\mu_{ij}^v$  –  $v$ -ый путь множества  $\mu_{ij}$ ;  $v = \overline{1, N(i, j)}$ ,  $N(i, j)$  – количество путей множества  $\mu_{ij}$ .

Каждая ветвь  $\beta_{xy}$  сети ( $x, y = \overline{1, n}$ ),  $x \neq y$  характеризуется: *заданной* максимально возможной пропускной способностью  $c_{xy}$ ; *показателем* надежности  $p_{xy}$ ; *достоверностью* передаваемой информации  $d_{xy}$ ; *длиной*  $l_{xy}$ , определяемой географическим расстоянием между пунктами  $x$  и  $y$ ; *величиной* загрузки  $f_{xy}$ , определяемой суммарной величиной передаваемых по ветви требований  $\varphi_{ij}^v$ , пути передачи которых  $\mu_{ij}^v$  включают ветвь  $\beta_{xy}$ :

$$f_{xy} = \sum_{\forall \mu_{ij}^v \in \beta_{xy}} \varphi_{ij}^v(i, j = \overline{1, n}; x, y = \overline{1, n}; v = \overline{1, N(i, j)}).$$

Величина загрузки  $f_{xy}$  определяется в результате распределения потоков требований  $\Phi_{ij}(i, j = \overline{1, n}, i \neq j)$ . Здесь  $\varphi_{ij}^v$  – часть требования  $\Phi_{ij}$ , для распределения которого используется путь  $\mu_{ij}^v$ . Используются и другие характеристики.

В соответствии с этим пути, образуемые ветвями, также характеризуются показателями, определяемыми характеристиками ветвей, составляющих путь. При этом параметр  $k_{ij}^v$  пути  $\mu_{ij}^v$ , характеризующий качество обслуживания потока  $\Phi_{ij}$  в сети по данному пути, определяется частичными критериями  $K_s$  – функциями от выбранного пути, где  $s$  – номер частичного критерия,  $s = \overline{1, S}$ ,  $S$  – количество частичных критериев, характеризующих качество обслуживания. Поскольку значение каждого из частичных критериев определяется характеристиками ветвей  $\beta_{xy}$ , составляющих путь, имеем:

$$k_{ij}^v = F_{\forall \beta_{xy} \in \mu_{ij}^v} (K_1, K_2, \dots, K_s, \dots, K_S) \quad (1)$$

Как отмечалось, основными характеристиками путей  $\mu_{ij}^v$  являются пропускная способность  $f_{ij}$ , определяемая пропускной способностью  $c_{xy}$  ветвей  $\beta_{xy}$ , составляющих путь, ранг  $R_{ij}$ , показатели надежности  $P_{ij}$  и достоверности  $D_{ij}$  передаваемой информации по пути  $\mu_{ij}^v$ , длина  $L_{ij}$  и др. [1, 3]. Под рангом пути понимают количество ветвей сети, составляющих путь. Таким образом, выражение (1) может быть представлено в виде:

$$k_{ij}^v = F_{\forall \beta_{xy} \in \mu_{ij}^v} (f_{ij}, R_{ij}, P_{ij}, D_{ij}, L_{ij}) \quad (2)$$

Зависимость параметра  $f_{ij}^v$  пути  $k_{ij}^v$  от величины загрузки  $f_{xy}$  ветвей  $\beta_{xy}$ , образующих путь  $\mu_{ij}^v$ , будем понимать в том смысле, что чем выше значение  $f_{xy}$  ветвей  $\beta_{xy}$ , образующих путь  $\mu_{ij}^v$ , тем более высокую пропускную способность соответствующих ветвей сети предполагается использовать для обслуживания потоков, что приводит к повышению качества обслуживания  $k_{ij}^v$  потока  $\varphi_{ij}^v$  в сети.

С учетом того, что все значения  $f_{ij}, R_{ij}, P_{ij}, D_{ij}, L_{ij}$  определяются характеристиками ветвей  $\beta_{xy}$ , составляющих путь, выражение (2) может быть записано в виде:

$$k_{ij}^v = F_{\forall \beta_{xy} \in \mu_{ij}^v}^v(f_{xy}, KB_{ij}^v, p_{xy}, d_{xy}, l_{xy}), \quad KB_{ij}^v - \text{количество ветвей, составляющих путь } \mu_{ij}^v. \quad (3)$$

Таким образом, среди всех возможных путей распределения потоков требований в сети необходимо использовать пути  $\mu_{ij}^v$  максимально возможной пропускной способности ветвей, образующих пути, минимально возможного ранга, максимально возможных надежности и достоверности передаваемой информации, минимально возможной длины.

Отметим также, что для оценки качества обслуживания по выбранному пути распределения потоков требований могут быть использованы и другие критерии.

Задача определения оптимального плана распределения потоков требований на раздачу необходимой нагрузки по критерию гарантированного качества обслуживания формулируется следующим образом.

На множестве  $\{M\}$  планов  $M = \{M_1, M_2, M_3, \dots\}$  (возможных структур ТКС с распределением потоков требований), в котором каждому плану поставлено в соответствие значение  $K$  – критерия оптимальности плана  $K\{M\} = K\{M_1, M_2, M_3, \dots\}$ , найти план, которому соответствует гарантированное качество обслуживания потоков требований в сети:

$$K = \max_{\{M\}} \min_{i,j} k_{ij}^v(i, j = \overline{1, n}), \quad (4)$$

где  $v = \overline{1, N(i, j)}$ ,  $N(i, j)$  – количество путей множества  $\mu_{ij}$ , при ограничениях:

$$1) \ c_{ij}^v \geq 0;$$

2) суммарная пропускная способность  $c_{ij}^v$  всех путей, используемых для распределения потока требований  $\varphi_{ij}$ , должна по возможности равняться величине этого требования:

$$\sum_{v=1}^{N(i, j)} c_{ij}^v \leq \varphi_{ij}(i, j = \overline{1, n}), \quad (5)$$

где  $N(i, j)$  – число используемых путей для распределения потока требований  $\varphi_{ij}$ ;  $c_{ij}^v$  – пропускная способность пути  $\mu_{ij}^v$ ;

3) суммарная пропускная способность путей всех потоков требований, проходящих по ветви  $\beta_{xy}$ , не должна превышать предельной пропускной способности  $c_{xy}$  этой ветви:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{N(i, j)} c_{ij}^v \leq c_{xy}(x, y = \overline{1, n}, \mu_{ij}^v \in \beta_{xy}). \quad (6)$$

Отметим, что в выражении (3) показатель  $k_{ij}^v$  – это качество обслуживания части потока требований  $\varphi_{ij}^v$ , зависящее от выбранного пути  $\mu_{ij}^v$  распределения потока  $\varphi_{ij}$ .

Для определения качества обслуживания  $k_{ij}^v$  части  $\varphi_{ij}^v$  требования  $\varphi_{ij}$  по пути  $\mu_{ij}^v$  вводится скалярная аддитивная функция полезности:

$$k_{ij}^v = \sum_{s=1}^S K_s \omega_s, \quad (7)$$

где  $K_s$  – частичный критерий, характеризующий качество обслуживания по пути  $\mu_{ij}^v$  (пропускная способность, ранг, др.);  $\omega_s$  – весовые коэффициенты частичных критериев,

характеризующие их значимость, причем  $\sum_{s=1}^S \omega_s = 1$ ;  $S$  – количество используемых частичных критериев.

Для определения значений весовых коэффициентов  $\omega_s$  частичных критериев используем экспертные оценки приоритета частичных критериев [2] и сформируем матрицу приоритетов. По матрице приоритетов сформируем систему уравнений, решив которую, определим значения весовых коэффициентов  $\omega_s$  [1].

Покажем, как формируется матрица приоритетов для данных частичных критериев. Их порядковый номер соответствует последовательности (2). Кроме того, будем считать, что последовательность частичных критериев выстроена в соответствии с их значимостью, а именно: в данном примере наибольшей значимостью обладает параметр  $f_{xy}$  пути  $k_{ij}^v$ , зависящий от величины загрузки ветвей  $\beta_{xy}$ , затем – ранг  $R_{ij}$ , надежность пути и достоверность передаваемой информации по пути  $\mu_{ij}^v$ , длина  $L_{ij}$  пути.

Пусть значимость (приоритет) первого частичного критерия – величины загрузок  $f_{xy}$  ветвей  $\beta_{xy}$  – более значимости (приоритета) второго частичного критерия – ранга  $R_{ij}$  пути – и экспертная оценка приоритетов  $\omega_{12} = 5/1$ . Аналогично, на основании экспертных оценок, имеем:  $\omega_{13} = 8/1$ , ...,  $\omega_{23} = 5/1$  и т.д. На пересечении первой строки и второго столбца записываем «5». На пересечении второй строки и первого столбца записываем «1» и т.д. Значения диагональных элементов устанавливаем в нуль. Последний столбец содержит сумму элементов строки. Матрица приоритетов для рассматриваемых в примере частичных критериев с используемыми экспертными оценками представлена в табл. 1.

Матрица приоритетов						Табл. 1
	$f_{xy}$	$R_{ij}$	$P_{ij}$	$D_{ij}$	$L_{ij}$	$\pi_s$
$f_{xy}$	0	5	8	8	10	31
$R_{ij}$	1	0	5	8	10	24
$P_{ij}$	1	1	0	5	8	15
$D_{ij}$	1	1	1	0	5	8
$L_{ij}$	1	1	1	1	0	4

Для определения весовых коэффициентов  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$  имеем систему уравнений [1]:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{31}{24}; \quad \frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{31}{15}; \quad \frac{\omega_1}{\omega_4} = \frac{31}{8} \text{ и т.д., } \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 = 1.$$

Тогда:  $\omega_1 = 0,378$ ;  $\omega_2 = 0,292$ ;  $\omega_3 = 0,183$ ;  $\omega_4 = 0,098$ ;  $\omega_5 = 0,049$ .

Проверим:  $0,378 + 0,292 + 0,183 + 0,098 + 0,049 = 1$ .

Резльтирующий скалярный критерий для рассмотренного в табл. 1 примера можно представить следующим образом:

$$k_{ij}^v = 0,378K_1' + 0,292K_2' + 0,183K_3' + 0,098K_4' + 0,049K_5', \quad (8)$$

где  $K_1'$  – некоторое нормированное значение  $f_{xy}$ ;

$K_2'$  – некоторое нормированное значение  $R_{ij}$ ;

$K_3'$  – некоторое нормированное значение  $P_{ij}$ ;

$K_4'$  – некоторое нормированное значение  $D_{ij}$ ;

$K_5'$  – некоторое нормированное значение  $L_{ij}$ .

Для нормирования показателей целесообразно пользоваться выражением [1]:

$$K_s' = K_s / K_{s0}, \quad s = \overline{1, S},$$

где  $K_{s0}$  – некоторое опорное значение частичного критерия  $K_s$ ;

$S$  – количество используемых частичных критериев, в данном случае  $S = 5$ .

При использовании скалярной аддитивной функции полезности (взвешенной суммы (7)) в качестве опорных значений  $K_{s0}$  целесообразно выбирать их предельно допустимые

значения, поскольку при этом нормированное значение  $K'_s$  характеризует отклонение в значении частичного критерия  $K_s$  сравнительно с его предельно допустимым значением.

Матрица приоритетов (табл. 1) строится либо для каждого множества путей  $\mu_{ij}$ , либо для некоторой совокупности множеств путей, либо определяется единой для всех путей  $\mu_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, n}$ ) исходя из экспертных оценок [2].

Для приведенного в табл. 1 примера результирующий скалярный критерий, характеризующий качество обслуживания требования  $\varphi_{ij}^v$ , распределение которого осуществляется с использованием пути  $\mu_{ij}^v$ , будет иметь вид:

$$k_{ij}^v = 0,378 \frac{f_{xy}}{f_{xy \text{ опорн}}} + 0,292 \frac{R_{ij}}{R_{ij \text{ опорн}}} + 0,183 \frac{P_{ij}}{P_{ij \text{ опорн}}} + 0,098 \frac{D_{ij}}{D_{ij \text{ опорн}}} + 0,049 \frac{L_{ij}}{L_{ij \text{ опорн}}}. \quad (9)$$

Задача в постановке (4) при ограничениях (5) и (6) представляет задачу распределения в сети многопродуктового потока, которая формулируется как задача дискретного математического программирования. Для решения задач такого класса в сетях большой размерности целесообразно проводить разработку эвристических алгоритмов, основанных на использовании методов параллельного или последовательного распределения потоков требований, итерационных процедур получения плана распределения с последующим улучшением плана и т.д.

Очевидно, что степень приближения полученного решения задачи (4) с ограничениями (5) и (6) к оптимальному решению определяется эффективностью используемых алгоритмов.

Разработанный алгоритм основан на формировании последовательности планов распределения потоков требований на сети, сходящейся с заданной точностью к оптимальному в смысле критерия (4) плану. Суть алгоритма сводится к следующему.

1) Предварительное ранжирование потоков требований  $\varphi_{ij}$  для определения очередности их распределения в сети, исходя из необходимой пропускной способности тракта передачи. Наиболее высокую приоритетность должны иметь требования, соответствующие использованию телевизионных каналов общенационального уровня, затем – телевизионных каналов регионального уровня, затем – мультимедийного трафика и т. д.

2) Построение очередного  $k$ -го плана  $M_k$ . При построении очередного плана производится последовательное распределение потоков требований на сети. Эта последовательность определяется в соответствии с проведенным ранжированием. Для каждого потока требований  $\varphi_{ij}$  определяются пути  $\mu_{ij}^v$  множества  $\mu_{ij}$  допустимых путей распределения потока ( $v = \overline{1, N(i, j)}$ ), число которых  $N(i, j)$  либо заранее задается, либо определяется возможностями сети. Для формирования путей  $\mu_{ij}^v$  целесообразно использовать разработанные эффективные вычислительные алгоритмы решения задачи поиска заданного числа кратчайших путей, оптимальных по заданному множеству частичных критериев [3]. Распределение частей  $\varphi_{ij}^v$  потока требований по путям  $\mu_{ij}^v$  осуществляется пропорционально пропускным способностям  $c_{ij}^v$  этих путей.

Для каждого пути  $\mu_{ij}^v$  плана  $M_k$  – определение показателя качества  $k_{ij}^v$  обслуживания требования  $\varphi_{ij}^v$  по данному пути (в соответствии с (9)).

3) Формирование значения критерия оптимальности  $K(M_k)$  плана  $M_k$  в соответствии с (4).

4) Проверка условия получения решения задачи :

$$| K(M_k) - K(M_{k-1}) | \leq \varepsilon, \quad \text{где } \varepsilon - \text{принятая точность решения.} \quad (10)$$

Здесь  $k$  – номер очередного плана. В качестве исходного значения принимается  $K(M_0)=0$ . Если условие (10) выполняется, алгоритм работу заканчивает, иначе – переход к построению очередного плана – к п. 2 алгоритма.

Необходимо отметить следующее. При построении начального ( $M_1$ ) и каждого последующего плана ( $M_k$ ) загрузка  $f_{xy}^{(1)}$  ( $f_{xy}^{(k)}$ ) каждой ветви  $\beta_{xy}$  распределяемыми потоками

определяется как суперпозиция величин потоков, использующих эту ветвь. В результате может оказаться, что некоторые ветви “перегружены”, т.е. не выполняется ограничение (6). Поэтому указанным ветвям назначается “штраф”, величина которого определяется степенью их “перегрузки”. “Штраф” может выражаться, например, в фиктивном уменьшении пропускной способности этих ветвей или показателей надежности и т.д., т.е. в ухудшении тех характеристик ветвей, которые являются определяющими при построении путей. Эта процедура обеспечивает уменьшение использования указанных ветвей при построении путей распределения потоков требований в очередном плане.

Сходимость алгоритма обеспечивается тем, что возможные величины «перегрузок» ветвей, т.е. невыполнение ограничения (6) в процессе построения планов  $M_k$  следует контролировать таким образом, чтобы каждый последующий план отличался от предыдущего уменьшением значения максимальной величины перегрузок по всем ветвям сети.

Полученный результирующий план (в соответствии с критерием (4)) содержит следующую информацию:

**По каждому** требованию  $\varphi_{ij}$  :

- пути  $\mu_{ij}^v \in \mu_{ij}$  распределения частей потоков  $\varphi_{ij}^v$ , при этом  $\sum_{v=1}^{N(i,j)} \varphi_{ij}^v \leq \varphi_{ij}$  ;
- пропускные способности  $c_{ij}^v$  путей  $\mu_{ij}^v \in \mu_{ij}$  .

**По каждой** ветви  $\beta_{ij}$ :

- величина суммарной пропускной способности ветви, используемой при распределении всех потоков требований;
- перечень потоков требований  $\varphi_{ij}^v$ , в пути распределения которых  $\mu_{ij}^v$  включена ветвь  $\beta_{xy}$ ;
- часть  $c_{ij}^v$  пропускной способности  $c_{xy}$  ветви  $\beta_{xy}$ , используемая в пути  $\mu_{ij}^v$  распределения потока требований  $\varphi_{ij}^v$ . ( $i, j = \overline{1, n}$ ;  $x, y = \overline{1, n}$ ;  $v = \overline{1, N(i, j)}$ ).

Кроме того, для каждой ветви формируется информация о выполнении ограничения (6).

Результирующий план должен быть построен таким образом, чтобы ограничения (5) и (6) выполнялись, однако, возможна ситуация, при которой ограничение (6) выполняется не для всех ветвей, используемых для распределения потоков в полученном плане.

Его невыполнение для некоторой ветви  $\beta_{xy}$  после окончания работы алгоритма свидетельствует о том, что заданная максимально возможная пропускная способность  $c_{xy}$  этой ветви не соответствует существующей потребности, т.е. сеть не способна полностью обеспечить распределение потоков требований. Следовательно, существует необходимость изменения заданной величины максимально возможной пропускной способности  $c_{xy}$  указанной ветви  $\beta_{xy}$ .

Таким образом, в результате работы алгоритма на основании полученного оптимального плана распределения потоков требований в сети в соответствии с критерием (4) гарантированного качества обслуживания потоков требований определяются необходимые пропускные способности тех ветвей сети, которые следует использовать при распределении потоков требований, т.е. определяется структура телекоммуникационной сети.

## Литература

1. Стеклов В.К. Прєктування телекомунікаційних мереж / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман ; за ред. В.К.Стеклова. – Техніка, 2002. – 792 с..
2. Князева Н.О. Теорія проектування комп'ютерних систем і мереж. Ч.1. Основи системного підходу до проектування / Н.О. Князева, О.А. Князева: – Одеса: ВМВ, – 2008. – 212с.
3. Князева Н.О. Теорія проектування комп'ютерних систем і мереж. Ч.2. Методи аналізу і синтезу комп'ютерних мереж / Н.О. Князева.– Одеса: СПД Бровкін О.В., – 2012. – 240 с.