

## Занятие № 12. “Анализ сети на основе их математических моделей”

### 1. Основные модели сетей связи

В настоящее время существуют несколько типов моделей: физические, математические, имитационные, алгоритмические, экономические и др. Физическая модель какого-либо реального объекта представляет его отображение в масштабе. Имитационные модели как правило описывают процессы протекающие в реальной системе, в том числе, и в сети связи. Такие модели выполняются чаще всего в виде специальных программ, отражающих исследуемый процесс, и реализуются на компьютерах. Алгоритмические модели также отражают протекающие в системе процессы, и представляют характеризующие их определенные последовательности операций, например, обслуживание заявок на установление соединений в сети связи. Экономические модели позволяют определить основные закономерности между затратами на создание системы (ее обслуживание, развитие, ремонт) и получаемый от ее применения экономический эффект.

При исследовании сетей связи (принятии решений на их построение, оценка этих решений, расчет параметров, решение других сетевых задач) широкое применение находят математические модели, которые в виде математических выражений дают четкое описание состава сети, взаимосвязи между ее элементами, протекающих и них процессов. В этих моделях наиболее полно отображаются основные признаки или свойства моделируемой сети, а второстепенные (с точки зрения конкретно поставленной задачи) могут опускаться. Сети связи как сложной организационно-технической системе могут быть даны морфологическое и функциональное описания.

Морфологические модели сети связи дают описание ее состава, типов взаимосвязей между ее элементами, взаимное расположение этих элементов. Широкое применение при создании морфологических моделей сетей связи находят элементы аналитической математики, теории графов, методы алгебры матриц и матричного исчисления.

Функциональные модели сети связи раскрывают основные закономерности протекающих в этих сетях процессов, связанных с обслуживанием поступающих в сеть заявок на установление соединений, реакцией на технические отказы, возникающие в технических средствах этой сети, восстановление поврежденных и пораженных ее элементов или участков и т.п.

### Использование графов для представления путей

Наиболее распространенной моделью сети связи, дающей ее морфологическое описание, является граф  $G(N, M)$ , вершины  $N$  которого инцидентны КЦ, а ребра  $M = N \times N$  – ветвям описываемой сети.

В состав сети связи кроме простых элементов (КЦ и ветви) могут входить составные – направления связи, включающие в свою очередь пути и сечения. Под направлением связи понимается совокупность ее элементов, обеспечивающих установление соединения и обмен сообщениями между источниками и потребителями информации. Для передачи информации по сети в каждом принадлежащем ей направлении связи выделяются один или несколько путей установления соединений. Путь ( $\pi$ ) в сети связи представляет собой последовательность конечных ( $n^0$ ) и транзитных ( $n^T$ ) КЦ, а также соединяющих их ветвей. Так как любая ветвь сети связи может обозначаться через связываемые ею КЦ, то

$$\pi = n_1^0 \cap n_2^T \cap n_3^T \cap \dots \cap n_{k-1}^T \cap n_k^0,$$

где  $n_1^0, n_k^0 \in N^0$ ;  $n_2^T, n_3^T, \dots, n_{k-1}^T \in N^T$ .

В любом направлении связи при наличии нескольких ( $k$ ) путей:  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$ , безотносительно к их взаимной зависимости,

$$n_1^0(\pi_1) = n_1^0(\pi_2) = \dots = n_1^0(\pi_k) \text{ и } n_k^0(\pi_1) = n_k^0(\pi_2) = \dots = n_k^0(\pi_k),$$

т. е. все пути одного направления связи содержат одни и те же ( $n_1^0$  и  $n_k^0$ ) конечные КЦ.

Пути в сети связи могут быть *независимыми* или *зависимыми*.

Считается, что пути  $\pi_1$  и  $\pi_2$  одного направления связи являются независимыми, если  $n_i^T(\pi_1) \notin N^T(\pi_2)$ , а  $n_i^T(\pi_2) \notin N^T(\pi_1)$ .

Любой путь установления соединения характеризуется его длиной. Длина пути чаще всего выражается числом  $k$  составляющих его КЦ или  $k - 1$  входящих в него ветвей. Кратчайшим является путь, у которого  $k = k_{\min}$ . В ряде случаев длина пути определяется его километрической длиной, стоимостью или другими параметрами.

В качестве иллюстрации рассмотрим сеть связи, представленную на рис. 1, графом  $G(N, N \times N)$ , где  $N = \{n_I - n_{I0}\}$ .

Для произвольного направления связи, например  $J_{47}$ , могут быть выделены три независимых пути установления соединений:

$$\begin{aligned}\pi_{47}(\text{I}) &= \{n_4^0, n_1^T, n_2^T, n_3^T, n_7^0\}; \\ \pi_{47}(\text{II}) &= \{n_4^0, n_5^T, n_6^T, n_7^0\}; \\ \pi_{47}(\text{III}) &= \{n_4^0, n_8^T, n_9^T, n_{10}^T, n_7^0\}.\end{aligned}$$

Очевидно, что путь  $\pi_{47}(\text{II})$  является кратчайшим. Как видно из примера, каждый (путь содержит подмножество  $N^T_i(k)$ . Так,  $N^T_{47}(\text{I}) = \{n_1^T, n_2^T, n_3^T\}$ ,  $N^T_{47}(\text{II}) = \{n_5^T, n_6^T\}$ ,  $N^T_{47}(\text{III}) = \{n_8^T, n_9^T, n_{10}^T\}$ .

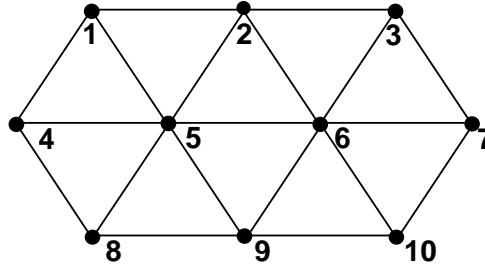


Рис.1. Граф сети связи

Для сетей связи, содержащих односторонние по вызову каналы связи или используемые независимо каналы передачи, равенство  $J_{ij} = J_{ji}$  оказывается несправедливо. В этом случае, т.е. если  $J_{ij} \neq J_{ji}$  описывающий такую сеть граф  $G(N, \overline{N \times N})$  является ориентированным полностью или частично. При составлении путей установления соединений и определении сечений операции с таким графом осуществляются с учетом направленности его ребер.

### Использование матриц для представления путей

Другими моделями, дающими морфологическое описание, сети связи, являются матрицы. Наиболее часто используются матрицы связности  $\|A\|$  и мощностей  $\|V\|$ . В зависимости от типа применяемых на сети связи каналов используются четырехугольные (при односторонних каналах) или треугольные (при двухсторонних каналах) матрицы:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{iN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{Nj} & \cdots & a_{NN} \end{vmatrix} \quad V = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1j} & \cdots & v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2j} & \cdots & v_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{i1} & v_{i2} & \cdots & v_{ij} & \cdots & v_{iN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{N1} & v_{N2} & \cdots & v_{Nj} & \cdots & v_{NN} \end{vmatrix}$$

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1N} \\ & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2N} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & a_{ij} & \cdots & a_{iN} \\ & & & & \cdots & \cdots \\ & & & & & a_{NN} \end{vmatrix} \quad V = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1j} & \cdots & v_{1N} \\ & v_{22} & \cdots & v_{2j} & \cdots & v_{2N} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & v_{ij} & \cdots & v_{iN} \\ & & & & \cdots & \cdots \\ & & & & & v_{NN} \end{vmatrix}$$

Элемент матрицы  $a_{ij}$  может принимать два значения:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если имеется ветвь сети связи, соединяющая} \\ & \text{непосредственно КЦ } n_i \text{ и } n_j; \\ 0, & \text{если отсутствует ветвь сети связи между} \\ & \text{КЦ } n_i \text{ и } n_j. \end{cases}$$

Элемент матрицы  $v_{ij}$  принимает значение, равное числу каналов в ветви между КЦ  $n_i$  и  $n_j$ . Следует иметь в виду, что

$$v_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если отсутствует внутренняя связь между} \\ & \text{абонентами КЦ } n_i; \\ >0, & \text{если предусматривается внутренняя связь между} \\ & \text{абонентами КЦ } n_i. \end{cases}$$

Если по условиям решаемой задачи внутренние связи между абонентами КЦ не учитываются, то в четырехугольных матрицах сетей с односторонними каналами принимается  $a_{ii} = n_{ii} = 0$ , а при описании сетей связи с двухсторонними каналами могут использоваться наддиагональные матрицы:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1N} \\ & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2N} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & a_{ij} & \cdots & a_{iN} \\ & & & & \cdots & \cdots \\ & & & & & a_{(N-1)N} \end{vmatrix} \quad V = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1j} & \cdots & v_{1N} \\ & v_{22} & \cdots & v_{2j} & \cdots & v_{2N} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & v_{ij} & \cdots & v_{iN} \\ & & & & \cdots & \cdots \\ & & & & & v_{(N-1)N} \end{vmatrix}$$

Считается, что между КЦ  $n_i$  и  $n_j$  существует путь установления соединений и передачи сообщений, если существует последовательность  $a_{ik}, a_{kl}, \dots, a_{mq}, a_{ql}$  ( $v_{ir}, v_{kb}, \dots, v_{lq}, v_{qj}$ ) в которой ни один элемент не равен 0.

Возвращаясь к ранее рассмотренному примеру, можно записать матрицу связности  $\|A\|$  для сети связи, граф которой представлен на рис. 1. Считая, что на этой сети используются двухсторонние каналы, треугольная и наддиагональные матрицы имеют вид:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & & & & & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ & & & & & & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & & & & & 0 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & 0 & 1 \\ & & & & & & & & & 0 \end{vmatrix}, \quad A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 1 & 1 \\ & & & & & & & 0 & 0 & 1 \\ & & & & & & & & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & 1 \end{vmatrix}$$

Используя аппарат теории графов и матриц, можно достаточно строго исследовать принципы построения и комбинаторные возможности сетей связи любого типа. При этом необходимо следить, чтобы за математическими операциями не терялся физический смысл проводимых преобразований.

## 2. Основные характеристики телекоммуникационных сетей

Телекоммуникационные сети в подавляющем большинстве случаев относятся к сложным организационно-техническим системам, описание которых можем осуществляться лишь с помощью целого ряда характеристик. Для систематизации описания сетей связи и удобства использования этих характеристик они сведены в определенные группы: морфологические характеристики, характеристики функционирования сетей связи и экономические характеристики.

К **морфологическим** относятся **характеристики**, описывающие сеть связи с точки зрения ее состава, взаимного соединения и/или расположения ее элементов. Они определяют конфигурацию сети связи с заданной степени детализации. Процессы, протекающие в сети связи и ее элементах в характеристиках данной группы не рассматриваются. В состав группы входят: архитектура, структура, топология и стереология.

В настоящее время для термина «архитектура» нет узаконенного каким либо документом или общепризнанным изданием определения. Несмотря на это в литературе и документах по связи этот термин встречается все чаще. Поэтому для определения понятия архитектура обратимся к его первоначальному значению. В Толковом словаре русского языка наиболее приемлемым применительно к сети (системе) связи является толкование этого понятия как:

совокупность черт, приемов и средств, характерных для определенного направления в

строительстве каких-либо сооружений (систем);  
стиль строительства сооружения, здания (системы).

В этом же словаре в одном из значений понятие «стиль» определяется как «совокупность черт, приемов и средств, обуславливающих собой единство какого-нибудь направления в творчестве (строительстве)». Это дополнение фактически объединяет два предыдущих определения. Нельзя не отметить, что даже поверхностный анализ позволяет сделать однозначный вывод о зависимости архитектуры (стиля) любой системы (сооружений) от ряда факторов и, в первую очередь, от времени и используемых в различных временных промежутках средств и технологий строительства.

В материалах о Единой сети электросвязи (ЕСЭ) РФ приводится описание архитектуры этой сети (хотя четкое определение этого понятия отсутствует). Понятие архитектуры сети связи встречается также в ряде зарубежных (в том числе переводных) источников.

При анализе построения сетей связи используются различные уровни абстракции – от концепции до описания конкретной сети. При этом используется четкий ряд понятий: характеристика, параметр, показатель, критерий. Наиболее общим из указанных понятий является характеристика. Из приведенных выше определений можно заключить, что архитектура является одной из характеристик, в рассматриваемом случае – характеристикой сети связи. Из теории сетей связи известно, что характеристики четко делятся на два вида: морфологические характеристики и характеристики функционирования. Как уже отмечалось выше морфологические характеристики дают описание состава сети связи, типов ее компонентов, взаимосвязи между ее элементами и других данных, связанных с конфигурацией сети, не затрагивая протекающих в ней процессов.

Обобщая сказанное выше, можно считать, что *архитектура сети связи является ее морфологической характеристикой, определяющей состав, раскрывающий типы образующих ее функциональных компонентов, иерархию и характер их взаимодействия.*

#### Структура сети связи

Под *структурой сети связи* понимается характеристика, определяющая взаимосвязи коммутационных центров этой сети, обуславливающие возможности распределения на ней потоков сообщений, независимо от фактического расположения ее элементов на местности.

В соответствии с приведенным определением на структурах вторичных сетей связи показываются лишь коммутационные центры (КЦ), обеспечивающие выполнение всех видов оперативной коммутации, а на структурах первичных сетей – КЦ, на которых осуществляется выделение и распределение каналов передачи в интересах вторичных сетей.

Структура любой сети связи задается ее параметрами: числом КЦ  $N$ , числом соединяющих эти КЦ ветвей  $M$ , а в ряде случаев и мощностью этих ветвей  $V$ . Формами представления структур сетей связи являются:

схема взаимосвязи КЦ;

граф  $G(N \times M)$ , где  $N$  – число вершин, соответствующих КЦ, а  $M$  – число ребер, соответствующих ветвям сети связи;

матрица связности  $\|A\|$ ;

матрица мощностей  $\|V\|$ ;

таблица взаимосвязи КЦ и мощностей ветвей рассматриваемой сети связи.

Наглядное представление структуры сети связи дает схема взаимосвязи КЦ (рис. 2). Как уже отмечалось, на такой схеме вторичной сети показываются КЦ, выполняющие все виды оперативной коммутации.

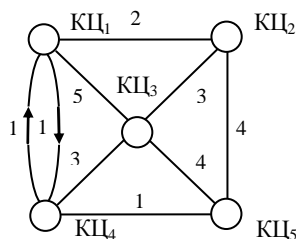


Рис. 2. Схема взаимосвязи КЦ сети связи

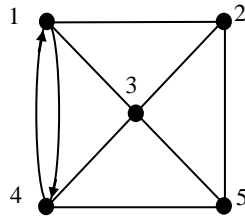


Рис. 3. Граф сети связи

При необходимости на схеме может быть показано разделение ветвей на пучки, отличающиеся эксплуатационно-техническими возможностями, направлением вызова (на схеме показаны стрелками), а также указаны мощности ветвей или их пучков. Иногда схему взаимосвязи КЦ называют структурной схемой сети связи.

Представление структуры в виде графа (рис. 3) является весьма удобным при моделировании комбинаторных свойств сетей связи. В соответствии с задачей и методом исследования ребрам графа, описывающим структуру сети связи, могут приписываться значения различных параметров: длина ветви, ее мощность, пропускная способность, вероятность поражения и т. д. Структура сети связи отображается ненаправленным графом, если используются двусторонние каналы, либо направленным графом при использовании односторонних каналов (по вызову или направлению передачи). Могут быть и комбинированные варианты. Представление структуры сети связи в виде графа оказывается удобным при математических преобразованиях с целью получения каких-либо эквивалентных параметров, решения задач декомпозиции сети на отдельные ее компоненты или суперпозиции нескольких сетей в единую сеть.

При аналитическом описании сети связи ее структуру удобнее представлять в матричной форме.

В случае одностороннего (по вызову) использования каналов могут быть использованы прямоугольные матрицы связности  $\{a_{ij}\}$  степени N либо матрицы мощностей ветвей  $\{v_{ij}\}$  той же степени (для указания числа типовых каналов в ветвях):

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{iN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{Nj} & \cdots & a_{NN} \end{vmatrix} \quad V = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1j} & \cdots & v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2j} & \cdots & v_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{i1} & v_{i2} & \cdots & v_{ij} & \cdots & v_{iN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{N1} & v_{N2} & \cdots & v_{Nj} & \cdots & v_{NN} \end{vmatrix}$$

При двухстороннем (по вызову) использовании каналов на ветвях рассматриваемой сети ее структура может быть представлена треугольными (наддиагональными) матрицами связности или мощностей.

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1N} \\ & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2N} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & a_{ij} & \cdots & a_{iN} \\ & & & & \cdots & \cdots \\ & & & & & a_{NN} \end{vmatrix} \quad V = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1j} & \cdots & v_{1N} \\ & v_{22} & \cdots & v_{2j} & \cdots & v_{2N} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & v_{ij} & \cdots & v_{iN} \\ & & & & \cdots & \cdots \\ & & & & & v_{NN} \end{vmatrix}$$

#### Топология сети связи

Решение задач организации связи, связанных с развертыванием коммутационных узлов и линий связи, распределением каналов и трактов по направлениям и ветвям сети связи, привязки элементов сети связи к местности связано с использованием морфологической характеристики, называемой топологией сети связи. *Топологией сети связи* называется характеристика, описывающая взаимное расположение входящих в эту сеть КЦ, группировки каналов по ветвям и направлениям (а в ряде случаев и по видам связи) и прохождение трасс линий связи на местности. На топологии показываются КЦ, выполняющие все виды оперативной и долговременной коммутации. В зависимости от полноты сведений, даваемых топологией о сети связи по условиям решаемой задачи,

условно различают *общую, полную топологию* этой сети и *частные топологии* ее участков.

### Стереология сети связи

*Стереологией* называется характеристика, описывающая пространственное расположение элементов сети связи их взаимосвязи, а при необходимости и характер перемещения элементов сети, находящихся над поверхностью земли. Использование средств связи на поднятых над поверхностью земли объектах имеет ряд специфических особенностей, которыми в первую очередь являются:

увеличение дальности действия радиосредств сети связи;

повышение возможности обеспечения связи в условиях сильно пересеченной местности, например в горах;

возможность создания центров распределения информации над недоступной или труднодоступной местностью (обширные болота, разливы паводковых вод, степные и лесные пожары и т.п.);

возможность непосредственной связи абонентов ВКЦ с абонентами удаленных от них наземных и воздушных КЦ, маневр каналами и канальными группами между различными КЦ, в том числе и ВКЦ.

Наибольшую наглядность дают проекции стереологической схемы на горизонтальную и вертикальную плоскости (рис. 4, а, б).

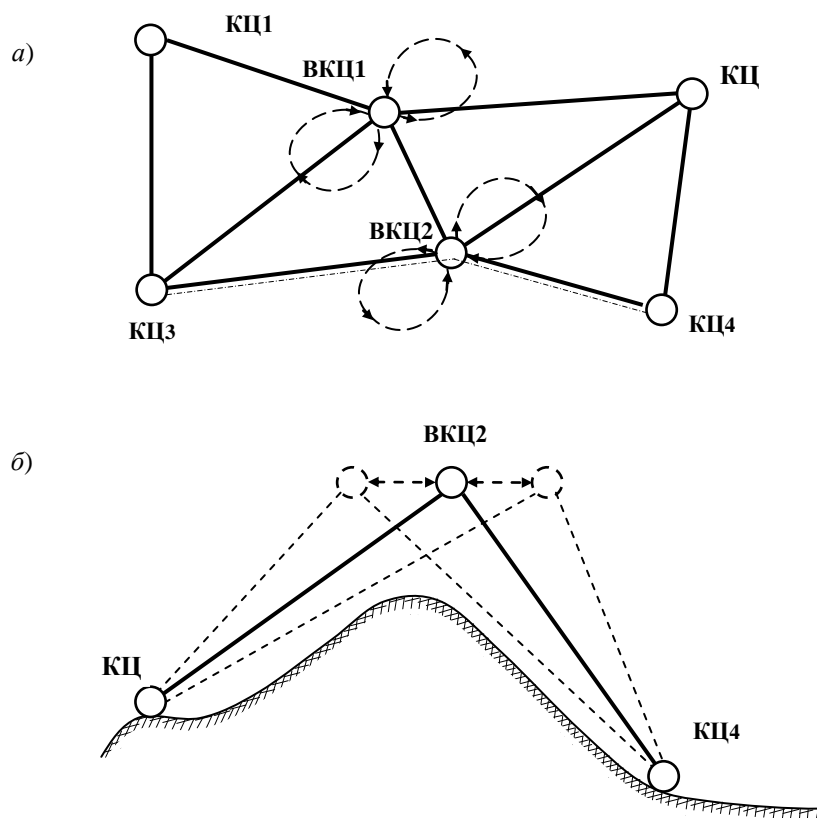


Рис. 4. Пример представления стереологии сети связи в виде проекций на горизонтальную (а) и вертикальную (б) плоскости

При применении ЭВМ для обеспечения связи на сетях с ВКЦ может использоваться цифровая координатная система представления места расположения воздушных и наземных элементов этих сетей. Кроме описания места расположения элементов сети связи с ВКЦ на стереологии могут приводиться также и другие специфические для этой сети данные.

**Характеристики функционирования** сети связи, в первую очередь рассматривают процессы, протекающие в сети связи и ее элементах: поступление и обслуживание заявок на установление соединений, занятие каналов и обслуживающих приборов для передачи сообщений, их освобождение, возникновение и устранение технических отказов, поражение и восстановление элементов сети и т.п. В свою очередь характеристики этой группы: образуют две большие подгруппы: характеристики целевого

предназначения сети связи, и технико-эксплуатационные характеристики.

#### Пропускная способность

Пропускная способность, являясь одной из характеристик сети связи, раскрывающих ее целевое предназначение, может рассматриваться, как ее свойство обеспечить передачу определенного объема информации в заданных направлениях при фиксированных вероятностно-временных ограничениях. В соответствии с определением рассматриваемая характеристика может рассматриваться как функция от двух параметров: объема передаваемой информации и вероятностно-временных показателей своевременности ее передачи.

Объем передаваемой информации в частных случаях может быть представлен различными показателями: числом сообщений, переданных слов, знаков и т. п. Однако каждый из этих показателей обладает в той или иной степени неопределенностью. Так, разные сообщения имеют различное число слов или групп, слова и группы – различную длину, на передачу различных знаков может потребоваться различное число символов и т. д. Наиболее общим показателем, характеризующим объем передаваемой за определенный период информации, является время, необходимое для передачи сообщений, содержащих требуемую для передачи информацию.

В теории телетрафика суммарное время передачи сообщений за определенный период ( $T$ ) называется нагрузкой. Это понятие может быть отнесено к пучку каналов, ветви, направлению связи или сети связи в целом. Нагрузка, выполненная на сети связи (или ее элементе) за период  $T = 1$  часу называется интенсивностью нагрузки ( $Y$ ) и измеряется в Эрлангах.

За вероятностно-временные ограничения в передаче информации, которые при определенных условиях однозначно определяют величину исполняемой сетью нагрузки, принимается показатель  $q$  качества обслуживания, выражающийся как вероятность (своевременного) установления соединения по заявке источника информации. На практике при оценке этого показателя, как правило, используется обратная величина. На сетях связи при обслуживании заявок по системе с потерями –  $1 - q = p$ , т. е. вероятность потери вызова из-за занятости оборудования (каналов, обслуживающих приборов КЦ) в требуемом направлении. При обслуживании заявок по системе с ожиданием –  $1 - q = P(t_{\text{ож}} > \tau)$ , т. е. вероятность превышения времени ожидания ( $t_{\text{ож}}$ ) обслуживания заявки заданной (нормированной) величины  $\tau$ . В связи с изложенным за обозначение пропускной способности сети связи принимается  $Y(p)$ . При различной степени детализации сети связи речь может идти также о пропускных способностях отдельных ветвей –  $Y_m(p_m)$  или направлений связи –  $Y_j(p_j)$ .

Наиболее простым (с точки зрения ее формального описания) элементом сети связи можно считать ее ветвь (пучок однотипных каналов), представляющую собой однофазную систему массового обслуживания. При поступлении на ветвь простейшего потока заявок величина  $Y_m(p_m)$  может быть получена из распределения Эрланга, а при поступлении потока заявок от ограниченного числа источников – из распределения Энгсета.

Пропускная способность направления связи  $Y_j(p_j)$  согласно общему определению равна выполненной в этом направлении нагрузке  $Y_j$  при заданной на нем вероятности потерь  $p_j$ . Если считать, что поступающая на данное направление нагрузка –  $Z_j$ , то выполненная в нем нагрузка –  $Y_j = Z_j(1 - p_j)$ . Разница между значениями интенсивностей поступающей ( $Z$ ) и выполненной ( $Y$ ) нагрузки составляет потерянную нагрузку ( $R$ ).

Величина  $Y_j(p_j)$  во многом определяется такими факторами, как состав направления связи, пропускная способность ветвей, образующих пути установления соединения и передачи сообщений в данном направлении связи, и алгоритм выбора этих путей.

Суммарная пропускная способность всех направлений связи определяет объем сообщений или нагрузку (в Эрлангах), прошедших через, сеть связи источников к потребителям информации, т. е. пропускную способность сети связи в целом (рис. 6.).

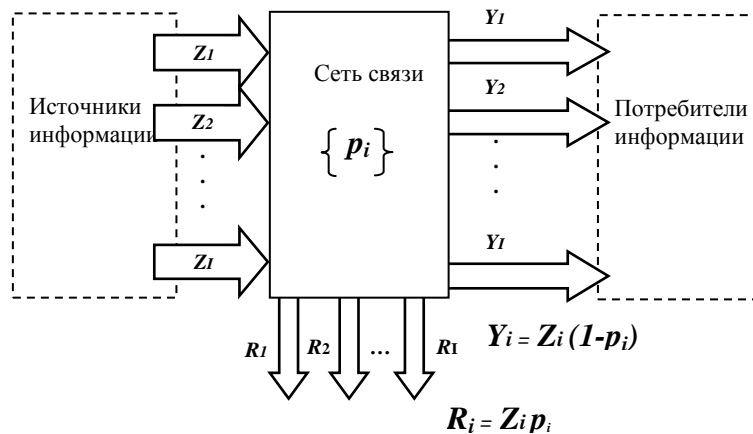


Рис. 6. Определение пропускной способности  $Y(p)$  сети связи

В связи с этим можно сформулировать следующее определение: под пропускной способностью сети связи понимается величина, численно равная суммарной интенсивности выполненной по всем направлениям связи нагрузки при обеспечении показателей качества обслуживания заявок заданного по каждому направлению связи. Следует, однако, отметить, что при решении практических задач, значения пропускной способности сети связи устанавливаются отдельно по каждому направлению связи, т. е.  $Y(p) = \{Y_{ij}(p_{ij})\}$ . В связи с этим пропускную

#### Живучесть сети связи

В процессе функционирования сети связи на ней могут возникать экстремальные ситуации, вызванные воздействием на сеть связи или ее участки разнородных внешних агрессивных факторов. Такими воздействующими на сеть связи факторами могут быть стихийные бедствия (землетрясения, крупные пожары, обвалы, наводнения, селевые потоки и т.п.) либо оружие противника.

В критических ситуациях многие параметры, определяющие нормальное функционирование сети связи по ее прямому предназначению, могут существенно отличаться от нормированных или средне статистических. В таких экстремальных ситуациях на первый план выступает свойство сети связи обеспечивать установление соединений и передачу сообщений по всем или отдельным наиболее важным направлениям связи, хотя бы и с ухудшением качества обслуживания, т.е. живучесть сети связи. В связи с изложенным, *под живучестью сети связи понимается ее свойство обеспечивать установление соединений и передачу сообщений между включенными в нее источниками и потребителями информации (в условиях внешнего воздействия) при выходе из строя ее элементов или участков. Качество обслуживания заявок при этом не нормируется.*

Численным показателем живучести сети связи является вероятность сохранения ее связности в целом или по отдельным направлениям.

#### Надежность сети связи

Заявки, поступающие от абонентов в сеть связи, могут теряться или задерживаться при обслуживании не только из-за занятости каналов (приборов КЦ) в требуемом направлении, но и в результате технических отказов или эксплуатационных ошибок, возникающих на элементах сети связи (обеспечивающих данное ИН). Характеристика, определяющая возможности абонентов по установлению соединений и передачи сообщений по сети связи в условиях ее реальной эксплуатации с сохранением заданного качества обслуживания получила название надежности функционирования сети связи.

Надежность сетей связи определяется совокупностью разнородных факторов, обуславливающих функционирование их элементов в реальных условиях эксплуатации.

Количественным показателем надежности функционирования сети связи является вероятность  $W(t)$ , безотказного обслуживания заявок на установление соединений, обусловленная как техническим состоянием каналов, так и вероятностью наличия в момент поступления заявки свободного канала. Если первое условие определяется техническими характеристиками используемых на сети средств связи, то второе условие зависит от принятой на сети системы обслуживания заявок (с потерями или с ожиданием). В соответствии с изложенным:



$$W(t) = R \cdot q = \begin{cases} R \cdot (1 - p) & \text{для систем с потерями,} \\ R \cdot \left( 1 - P(t_{\text{ож}} > \tau) \right) & \text{для систем с ожиданием,} \end{cases}$$

где  $R$  – вероятность безотказной работы элементов сети связи (ИН, ветви);  $q$  – вероятность безотказного (своевременного) обслуживания заявки на установление требуемых соединений в сети связи без технических отказов в ее элементах;  $p = 1 - q$  – вероятность потери заявок из-за занятости каналов или приборов КЦ идеально надежной сети связи («эрлангов» потери);  $P(t_{\text{ож}} > \tau)$  – вероятность того, что время ожидания начала обслуживания заявки превысит нормированную величину  $\tau$ .

Учитывая то, что на автоматизированных сетях связи с коммутацией каналов заявки в основном обслуживаются по системе с потерями, наибольшее применение получил первый из рассмотренных критериев оценки надежности функционирования этих сетей, т. е.  $W(t) = R \cdot (1 - p)$ .

Вероятность  $R$  безотказной работы элемента сети связи с достаточной для практических расчетов точностью может быть определена как:

$$R = k_{\Gamma} \cdot e^{-t/T},$$

где  $k_{\Gamma}$  – коэффициент готовности элемента;  $t$  – время выполнения задачи;  $T$  – общее время безотказной работы по прямому назначению (среднее время технического средства наработки на отказ – паспортная величина средства).

Значение коэффициента готовности, в свою очередь, может быть определено из выражения:

$$k_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_{\text{пр}}},$$

где  $T_{\text{пр}}$  – среднее время простоя технического средства (время восстановления), в течение которого оно не может по техническим причинам быть использовано по прямому назначению.

При образовании ветви несколькими ( $l$ ) параллельно включенными линиями связи (системами передачи) вероятность безотказной работы этой ветви может быть определена как:

$$R_m = 1 - \prod_{k=1}^l (1 - R_k),$$

где  $R_k$  – вероятность безотказной работы  $k$ -й линии связи, составляющей данную ветвь.

#### Функционирующая в сети связи нагрузка

Внутреннее состояние сетей связи, определяемое занятием их элементов для обслуживания поступающих заявок и передачи сообщений, характеризуется функционирующей в этих сетях нагрузкой. При этом *под функционирующей* понимается суммарная, исполняемая по всем ветвям сети связи, нагрузка  $Y_{\Phi}$ , т.е.

$$Y_{\Phi} = \sum_{j=1}^M Y_{m_j},$$

где  $Y_{m_j}$  – нагрузка (в Эрл), исполненная на ветви  $m_j$ ;  $M$  – число ветвей в сети связи.

Между функционирующей в сети связи нагрузкой  $Y_{\Phi}$  и пропускной способностью  $Y(p)$  этой сети существует определенная взаимосвязь. В общем случае

$$Y_{\Phi} \geq Y(p)$$

Равенство в выражении справедливо для некоммутируемых сетей связи, в которых каждому направлению связи соответствует одна единственная ветвь, принадлежащая только этому направлению связи. Для коммутируемой сети избыточные потоки заявок одних направлений могут переходить для обслуживания на обходные пути. А так как любой обходный путь является составным путем, то возникает дополнительная нагрузка:

$$Y_{\Phi}^{**} = m \sum_{i=1}^{L^*} Y_i^*,$$

где  $L^*$  – число направлений связи, на которых образуются избыточные потоки;  $Y_i^*$  – дополнительная нагрузка  $i$ -го направления связи, созданная избыточным потоком. Таким образом, в этом случае для коммутируемой сети связи:

$$Y_{\phi} > Y(p).$$

**Экономические характеристики** описывают сеть связи с точки зрения затрат на ее создание и эксплуатацию, а для сетей общего пользования и коммерческих сетей связи – дохода, получаемого за предоставляемые ею услуги связи. В эту группу характеристик входят: капитальные и эксплуатационные затраты, экономичность, окупаемость, рентабельность и др.