

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С КОЛЬЦЕВОЙ СТРУКТУРОЙ НА МАГИСТРАЛЬНОМ УЧАСТКЕ

Введение

Современное общество характеризуется бурным развитием информационных технологий во многих областях человеческой деятельности. Внедрение этих технологий базируется на широком использовании компьютерной техники, техники связи, развитии методов и средств передачи информации, распределенной обработки и хранении данных.

Рост числа источников и потребителей информации, увеличение расстояния между ними, повышение требований к оперативности и надежности доставки информации выдвигают требования организации эффективного взаимодействия удаленных ЭВМ между собой путем объединения их в сети и построение на их основе крупных информационно-управленческих систем различного назначения.

Анализ принципов построения систем на основе применения сетей ЭВМ показывает, что удовлетворение требований, предъявляемых к ним, достигается, прежде всего, за счет эффективного проектирования транспортных сетей передачи данных, являющихся основой для построения любой сети ЭВМ.

При проектировании транспортной сети передачи данных возникает задача синтеза ее оптимальной структуры (топологии). При этом при проектировании сети с учетом реально допустимых значений пропускных способностей каналов связи для выбранной технологии возникает ситуация, когда на некоторых участках проектируемой сети необходимо организовать каналы связи с пропускной способностью, превышающей максимально возможную для данной технологии передачи данных. В данном случае приходится либо строить дополнительные линии связи, или переходить на более производительные технологии передачи данных. В ряде случаев новые более производительные технологии накладывают дополнительные ограничения на топологию сети, например, требуют организации топологии сети в виде кольца. Кроме того, возникает ситуация, когда организация сети передачи данных с высокоскоростными каналами передачи данных нецелесообразна по причине недостаточной величины информационного потока на передачу. В последнем случае целесообразна организация гетерогенной сети передачи данных, состоящей из высокоскоростного магистрального участка и низкоскоростного участка. Низкоскоростной участок позволяет организовать доступ абонентов сети к магистральному сегменту и передавать данные в пределах группы узлов обслуживаемой одним и тем же узлом доступа. При этом на разных сегментах сети применяются разные технологии передачи данных.

В данной статье предлагается решение задачи организации гетерогенной сети, в которой высокоскоростная технология передачи данных на магистральном участке требует организации кольцевой структуры.

Постановка задачи

Рассмотрим постановку и математическую модель задачи синтеза структуры гетерогенной сети передачи данных (СПД) по критерию минимума стоимости.

Пусть имеется множество абонентов сети (АС) $A = \{a_i\}$ - источников информационных потоков и задач. Обозначим:

$\{x_i, y_i\}$ - географические координаты пункта нахождения абонента a_i ;

$H = \|h_{ij}\|$ - матрица потребности в передаче трафика между АС a_i и a_j ;

$Z = \{z_m\}$ - возможные места размещения оборудования доступа (ОД) в магистральный сегмент сети, $Z \subseteq A$;

$U = \{u_s\}$ - набор каналов связи (КС) определенной пропускной способности (ПС), применение которых возможно при организации низкоскоростного сегмента сети;

$V = \{v_k\}$ - набор каналов связи определенной пропускной способности, применение которых возможно при организации магистрального участка сети;

$D = \|d_{ij}\|$ - матрица приведенных затрат на строительство линии связи между АС a_i и a_j ;

$D^Z = \|d_{ij}^Z\|$ – матрица приведенных затрат на строительство линии связи между пунктами, где установлено оборудование доступа (ОД) на магистральном участке сети;

$d^{LS}(u_s)$ – приведенные затраты на организацию канала связи пропускной способности u_s на низкоскоростном сегменте сети;

$d^{HS}(v_k)$ – приведенные затраты на организацию канала связи пропускной способности v_k на магистральном участке сети;

$d(z_m)$ – приведенные затраты на установку ОД

Требуется определить фактические места размещения ОД $Z^* \subseteq Z$, подмножества абонентов подключаемых к каждому из них $A_z, z_j \in Z^*$ таким образом, чтобы минимизировать суммарные приведенные затраты на организацию сети в целом с учетом ограничений, связанных с использованием ОД и эксплуатационных параметров КС.

Введем следующие переменные:

$c_{ij} \in U$ – пропускная способность канала между АС a_i и a_j на низкоскоростном сегменте сети;

$c_{ij}^Z \in V$ – пропускная способность канала на магистральном участке сети;

$$b_{ij} = \begin{cases} = 1, \text{ если АС } a_i \text{ связана с } a_j \text{ низкоскоростным каналом связи,} \\ = 0 \text{ в противном случае;} \end{cases}$$

$$b_j^Z = \begin{cases} = 1, \text{ если в пункте } z_j \text{ установлено оборудование доступа,} \\ = 0 \text{ в противном случае;} \end{cases}$$

$$b_{ij}^Z = \begin{cases} = 1, \text{ если пункт } z_i \text{ связан с пунктом } z_j, \\ = 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Требуется найти такие $c_{ij}, c_z, b_{ij}, b_j^Z, b_{ij}^Z$, при которых

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[d^{LS}(c_{ij}) + d_{ij} \right] \cdot b_{ij} + \sum_{i \in Z} \left[d(z_i) b_i^Z + \sum_{j \in Z} \left[d^{HS}(c_{ij}^Z) + d_{ij}^Z \right] \cdot b_{ij}^Z \right] \rightarrow \min \quad (1)$$

при условии:

$$f_{ij}^{LS} \leq c_{ij}, \quad c_{ij} \in U \quad \forall i, j \in A, b_{ij} \neq 0; \quad (2)$$

$$f_{ij}^{HS} \leq c_{ij}^Z, \quad c_{ij}^Z \in V \quad \forall i, j \in Z^*, b_{ij}^Z \neq 0; \quad (3)$$

$$c_{ij}^Z = c^Z, \quad \forall i, j \in Z^*, b_{ij}^Z \neq 0; \quad (4)$$

$$\sum_{j \in Z^*} b_{ij}^Z = 2, \quad \forall i \in Z^*, \quad (5)$$

где f_{ij}^{LS} – трафик в канале связи между АС a_i и a_j на низкоскоростном участке сети; f_{ij}^{HS} – трафик в канале связи между пунктами, где установлено ОД на высокоскоростном участке сети; c^Z – пропускная способность канала связи на магистральном участке сети.

Поясним смысл ограничений. Неравенство (2) и (3) учитывают ограничение на трафик в канале и значение пропускной способности, которая должна выбираться из ряда допустимых значений. Условие (4) указывает на требование, чтобы все каналы связи на магистральном участке сети имели одинаковую пропускную способность. Условие (5) указывает на требование, чтобы магистральные участки имели кольцевую структуру и объединял все узлы, где установлено ОД.

Решение задачи

Для решения данной задачи предлагается следующий алгоритм, построенный на основе алгоритма New Clust [1], позволяющий синтезировать сеть передачи данных с концентраторами с рядом модификаций, учитывающих специфику решаемой задачи.

Предлагаемый алгоритм состоит из следующих этапов:

На первом этапе определяются зоны наибольшей концентрации требований на передачу информации и синтезируется первоначальная структура магистрального участка сети путем объединения их в кольцо.

На втором этапе:

- 1) создаются подмножества АС, подключаемых к каждому из узлов, где установлено ОД;
- 2) рассчитывается трафик в каналах связи магистрального участка, выбирается ПС из ряда допустимых значений;
- 3) производится оценка достижимого минимума ПС, которая может быть использована на магистральном участке;
- 4) выравнивается трафик в кольце посредством перегруппировки АС подключаемых к каждому из ОД.

На третьем этапе оптимизируется подсеть подключения АС к каждому из ОД.

На четвертом этапе рассчитывается стоимость полученного варианта сети.

На пятом этапе производится оптимизация первоначальной структуры сети посредством удаления пунктов доступа к магистральному участку и перегруппировки подключенных к нему АС к другому ОД. При этом при каждом удалении пункта доступа заново выполняются пункты этапов 2 и 3 и заново рассчитывается стоимость варианта сети. Если после удаления пункта доступа удалось уменьшить стоимость сети, то данный вариант принимается или в противном случае отклоняется.

Рассмотрим алгоритм подробнее:

Этап 1: Определение мест размещения ОД. Для этого используется эвристическая процедура для выбора мест размещения ОД в зоне наибольшей концентрации требований на передачу. Данный этап включает следующие шаги.

1. Для каждого АС создадим список, в который заносим K его ближайших соседей, принадлежащих множеству Z , где K является параметром проектирования, который влияет на величину зоны анализа при определении концентрации требований на передачу в зоне данного узла. Обозначим множество этих списков через $M = \{m_k\}$.
2. Для каждого узла $i \in Z$ определяем частоту его появления в списках других узлов f_i .
3. Обозначим $F = \max f_i$, тогда все узлы будут иметь одну из частот $l, l = 0, 2, 3, \dots, F$. Для каждого узла определим величину исходящего трафика в его зоне в случае установки в нем ОД:

$$S_i = \sum_{j=1, j \in Z}^N \sum_{k \in m_j} H_k + H_i, \quad H_i = \sum_{n=1}^N h_{ni}.$$

4. Определим $s_{\max} = \left\lceil \frac{\max S_i}{\min c_s} \right\rceil + 1$ и пересчитаем S_i в количество каналов минимальной пропускной способности, необходимых для передачи всего исходящего трафика в зоне узла $i \in Z$:

$$S_i^c = \left\lceil \frac{S_i}{\min c_s} \right\rceil + 1.$$

5. Определим количество узлов с одинаковым параметром S_i^c и обозначим через X_S . Получим

$$\sum_{s=1}^{S_{\max}} X_S = N_Z, \text{ где } N_Z - \text{ количество пунктов, в которых возможна установка ОД.}$$

6. Вычислим взвешенное среднее исходящего трафика зоны каждого узла

$$S_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{S=1}^{S_{\max}} S_i \cdot X_S. \text{ Величина } S_{cp} \text{ определяет нижнюю границу исходящего трафика зоны узла,}$$

где необходимо установить ОД.

7. Используя найденную величину S_{cp} , определяем текущее множество Z^* следующим образом: узел $i \in Z^*$, если $S_i > S_{cp}$

Этап 2: Разбиение узлов на подмножества и предварительное прикрепление АС к узлам, где установлено ОД.

1. Используя множество узлов, где установлено ОД Z^* , разбиваем исходное множество на подмножества узлов A^*_i закрепленных за $z_i \in Z^*$. Для этого должно выполняться условие:

$a_j \in A_i^*$, если $d_{ij} = \min_{z \in Z^*} d_{jz}$, т.е. узел a_j прикрепляется к ближайшему к нему узлу, где установлено

ОД.

2. Объединяем узлы, где установлено ОД в магистральное кольцо. Для этого построим цикл минимальной стоимости, который проходит через все узлы, где установлено ОД. Для решения этой подзадачи можно использовать один из известных алгоритмов решения задачи коммивояжера [2].

3. Определяем матрицу потребностей в передаче трафика, который необходимо передать через магистральный сегмент сети для всех узлов, где установлено ОД:

$$h_{ij}^* = h_{ij} + \sum_m \sum_n h_{mn}, \quad m \in A_i^*, n \in A_j^*, i, j \in Z^*.$$

4. Определим для всех узлов, где установлено ОД, суммарную величину трафика, передаваемую через магистральный сегмент к другим узлам $z_i \in Z^*$: $H_i^* = \sum_{j \in Z^*} h_{ij}^*$.

5. Используя величины h_{ij}^* , определяем потоки в каналах магистрального сегмента f_{ij}^{HS} и определяем пропускную способность каналов c^Z магистрального сегмента, удовлетворяющих ограничениям (3) и (4).

6. Определяем минимально достижимый поток в каналах магистрального сегмента при равномерном распределении исходящего трафика узлов вдоль магистрального кольца как

$$f_{\min}^{HS} = H_{cp}^* \cdot l_{cp} = \frac{\sum_{i \in Z^*} H_i^*}{n_Z} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{n_Z - 1}{2} + 1 \right),$$

где n_Z – количество узлов в множестве Z^* . Определяем

ближайшее допустимое значение пропускной способности каналов магистрального участка c_{min}^Z .

7. Если $c^Z = c_{min}^Z$, то переходим к этапу 3, а иначе необходимо перегруппировать привязку узлов к ОД.

8. Процедура перегруппировки заключается в том, что от самого нагруженного узла отсоединяются АС и подключаются к соседнему менее нагруженному. После каждой перегруппировки выполняются шаги 3..5. Если величина $\max h_{ij}^*$ уменьшилась, то вариант принимается и процедура повторяется для другого АС.

Этап 3: Оптимизируется подсеть подключения АС к каждому из ОД. Для решения этой подзадачи можно использовать один из известных алгоритмов решения задачи синтеза сети с концентраторами [3, 4]. Рассчитываем трафик в каналах сети и пропускные способности каналов на низкоскоростном участке.

Этап 4: Рассчитываем стоимость (1) полученного варианта сети.

На этапе 5 выполняется окончательная оптимизация сети.

Исследование предложенного алгоритма

Исследуем предложенный алгоритм. При проведении эксперимента будем анализировать два параметра работы алгоритма: затраты машинного времени $T_{\text{реш}}(N)$ и результирующую стоимость синтезируемой сети $W(N)$ в зависимости от количества АС в сети N . Также будет исследовано влияние на работу алгоритма параметра проектирования K , который, как видно из описания алгоритма, влияет на первоначально синтезируемый вариант сети, и, следовательно, может сильно влиять на результаты и время работы алгоритма. Так как при малом значении параметра K , при определении концентрации требований на передачи в зоне данного узла учитывается недостаточное количество соседних узлов, а при большом – увеличивается ошибка в оценке данной величины из-за того, что учитываются узлы из зон обслуживания соседних узлов. В этом случае будут анализироваться затраты машинного времени $T_{\text{реш}}(K)$ и результирующая стоимость синтезируемой сети $W(K)$ в зависимости от размера сети K . Кроме того, будем исследовать работу алгоритмов в зависимости от типа исходной матрицы приведенных затрат на строительство линий связи на низкоскоростном сегменте и на магистральном участке, а именно – матрицы затрат, которая пропорциональна кратчайшему расстоянию между узлами, т.е.

$$d_{ij} = v \cdot \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (6)$$

где v – затраты на единицу расстояния, и матрица затрат, которая пропорциональна расстоянию между узлами, найденному по правилу «городская планировка», т.е.

$$d_{ij} = v \cdot (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|). \quad (7)$$

Данная серия экспериментов проводилась на ПЭВМ Pentium III 700 МГц 256 МБайт ОЗУ под управлением ОС Windows 2000. Алгоритмы были реализованы на языке программирования Object Pascal с применением визуальной среды программирования Delphi 4. Реализованные алгоритмы имеют ограничение на размер синтезируемой сети – 255 узлов, что связано с применяемой техникой программирования и использованными типами переменных при написании программы.

Для формирования матрицы приведенных затрат использовался следующий алгоритм: сначала формировалось множество АС, заданных своими координатами, равномерно распределенных в пределах заданной территории (прямоугольный участок); затем определялись элементы матрицы по правилам «кратчайшего расстояния» и «городская планировка» при помощи формул (6) и (7) соответственно.

Для формирования матрицы потребностей в передаче трафика между АС использовался следующий алгоритм: для каждого пункта случайным образом задавалась величина генерируемого в нем трафика H'_i , равномерно распределенного в заданном диапазоне, затем определялись элементы матрицы как

$$h_{ij} = H'_i \cdot \frac{H'_j}{\sum_{k \in A} H'_k}.$$

Для реализации алгоритма решения задачи коммивояжера использовался метод ветвей и границ, суть которого заключается в том, что поиск дальнейшего пути прекращается, если его текущая длина превышает ранее найденный путь.

Исходными данными для работы данного алгоритма являлись:

- матрица приведенных затрат на строительство линии между узлами сети на низкоскоростном и магистральном участке (элементы матрицы формируются по правилу «кратчайшего расстояния» и «городская планировка», узлы сети располагаются в пределах прямоугольника 650x950). При этом в качестве затрат на единицу длины линии связи принимаем 100 ед. для низкоскоростного участка и 300 ед. - магистрального;
- матрица требований на передачу информации формируется по описанному выше алгоритму (диапазон случайно генерируемых величин принимаем равным 1...1024 кбит/сек);
- в качестве возможных мест установки оборудования доступа к магистральному сегменту принимаем все узлы сети;
- приведенные затраты на установку ОД во всех узлах принимаем равным 100 ед.;
- в качестве набора каналов для низкоскоростного участка и магистрального сегмента, а также затраты на их организацию представлены в таблице:

Таблица

| Низкоскоростной участок | | Магистральный сегмент | |
|-------------------------|---------|------------------------|---------|
| Пропускная способность | затраты | пропускная способность | затраты |
| 128 | 100 | 2 048 | 1 500 |
| 256 | 141 | 8 192 | 2 121 |
| 512 | 200 | 34 368 | 3 000 |
| 1 024 | 282 | 155 520 | 4 243 |
| 2 048 | 400 | 622 080 | 6 000 |
| | | 2 488 320 | 8 485 |

Исследование алгоритма проводилось в два этапа.

На первом этапе экспериментально определялось оптимальное значение для параметра проектирования K . Для этого при проведении эксперимента для каждого значения размера синтезируемой сети генерировалось 5 реализаций размещения АС, для каждого из которых генерировалось по 4 ре-

лизаций матриц требований на передачу, после чего запускался алгоритм с параметром K , величина которого менялась от 2 до одной трети количества АС. Число АС увеличивалось каждый раз на пять узлов. При этом контролировались время работы алгоритма и результирующая стоимость синтезируемой сети.

На втором этапе экспериментально определялись время работы алгоритма, результирующая стоимость синтезируемой сети и количество узлов, где установлено ОД, параметр K оставался постоянным. При этом для каждого значения размера синтезируемой сети генерировалось 7 реализаций размещения АС, для каждого из которых генерировалось по 6 реализаций матриц требований на передачу, после чего запускался алгоритм с параметром K , равным значению, определенному на первом этапе. Число АС увеличивалось каждый раз на пять узлов.

Данные работы алгоритмов регистрировались в файле, который затем были импортированы в программу MS Excel, с помощью которой были получены графические зависимости.

Анализ полученных результатов

Применение различных методов синтеза (формирование по правилу «кратчайшего расстояния» или «городская планировка») исходной матрицы приведенных затрат на строительство линии связи между узлами сети не дало качественно отличающихся результатов в анализируемых параметрах, зависимость временных затрат от размера сети имеют одинаковый характер для обоих методов синтеза. Это связано с тем, что для матрицы приведенных затрат, сформированных обоими методами, выполняется правило треугольника

$$v \cdot l_{ij} \leq v \cdot l_{ik} + v \cdot l_{kj} \quad \forall i, j, k. \quad (8)$$

Поэтому, учитывая это, а также то, что метод «кратчайшего расстояния» дает возможность более наглядного контроля оптимальности решения задачи, для дальнейшего исследования применялся метод «кратчайшего расстояния».

Результаты эксперимента по определению оптимальной величины параметра K приведены на рис. 1 и рис. 2.

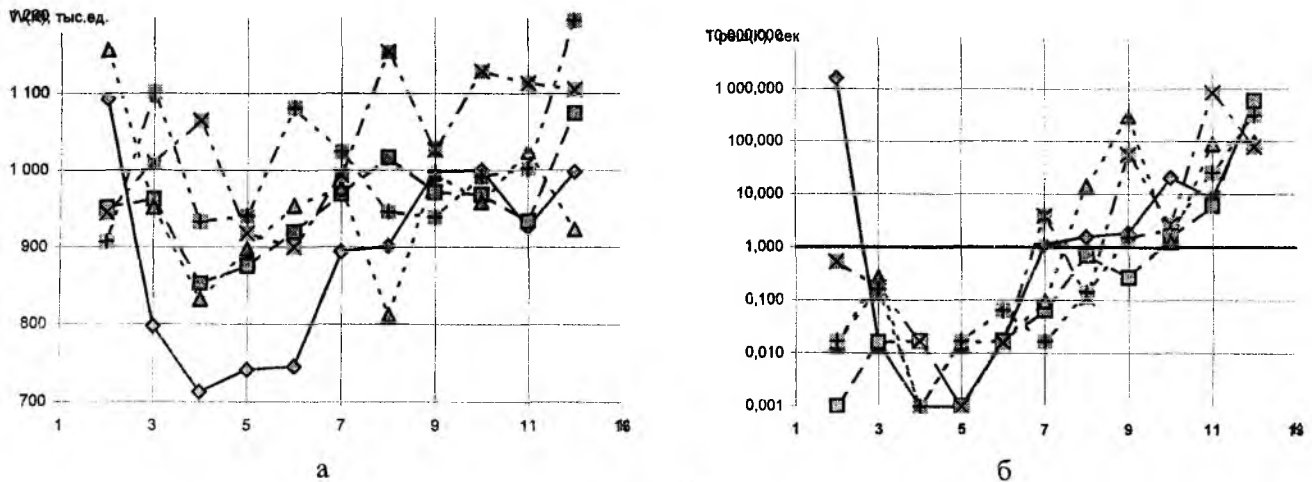


Рис. 1

На рис. 1 представлены графики контролируемых параметров (рис. 1, а – приведен график зависимости результирующей стоимости сети $W(K)$, рис. 1, б – зависимость времени работы алгоритма $t_{реш}$) от параметра K для 5 реализаций исходных данных при $N=35$. Из этих графиков виден большой разброс контролируемых параметров ($W(K)$ - $\pm 20\%$) - это связано с недостаточной точностью предварительной оценки величины трафика обслуживаемого в каждом из узлов при синтезе начальной структуры магистрального сегмента. Время работы алгоритма ($t_{реш}(K)$) имеет разброс от 0,001 сек до нескольких десятков минут, который можно объяснить применением алгоритма решения задачи коммивояжера, сложность которого пропорциональна факториалу количества узлов. На рис. 2 пред-

ставлены графики усредненных по всем реализациям исходных данных значений контролируемых параметров (на рис. 2, а приведен график зависимость результирующей стоимости сети $W(K)$, на рис. 2б – зависимость времени работы алгоритма от $t_{\text{реш}}(K)$) в зависимости от параметра K для 4 значений размеров сети $N=20, 25, 30, 35$.

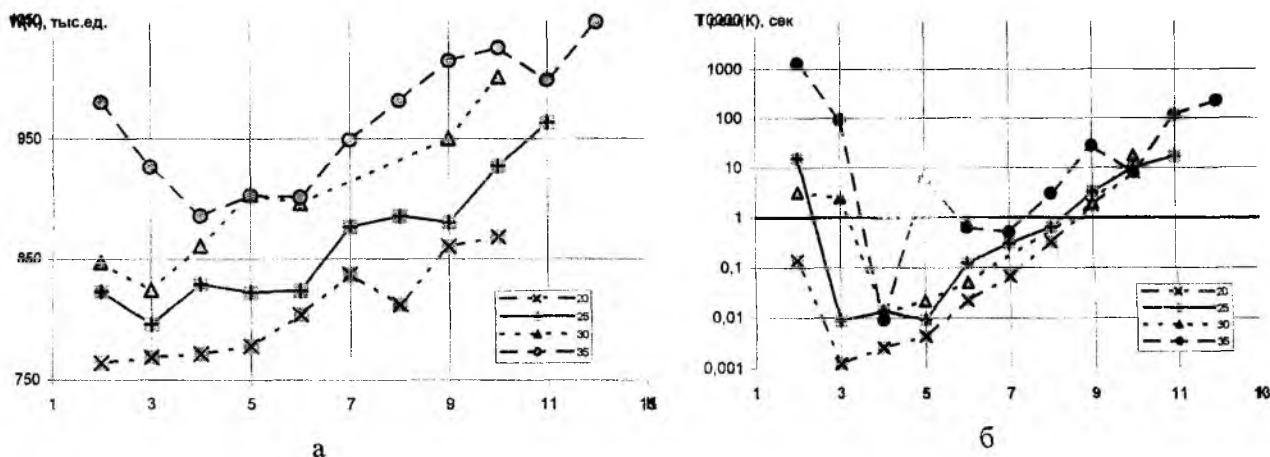


Рис. 2

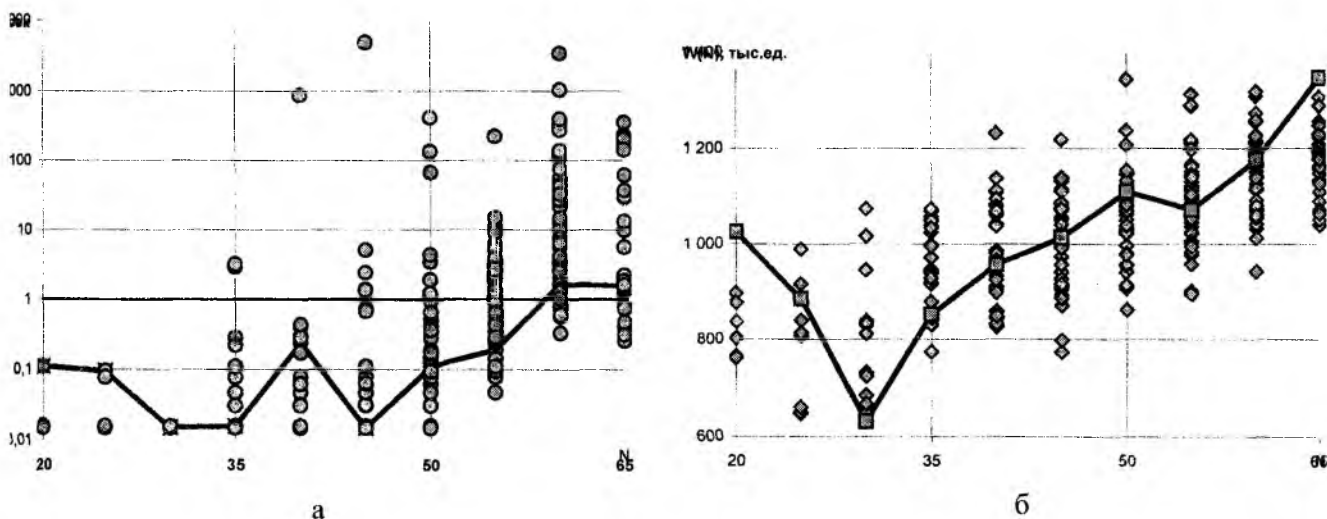


Рис. 3

Из этих графиков видно, что в среднем при $K=3..4$ достигается минимум значения целевой функции и времени работы алгоритма. При проведении исследования на втором этапе примем значение параметра $K=4$.

Результаты исследования алгоритма на втором этапе при $K=4$ представлены на рис. 3, на котором показаны отдельные реализации исходных данных, а также график усредненных по всем реализациям величин. На рис. 3, а представлена графическая зависимость результирующей стоимости синтезируемой сети $W(N)$, на рис. 3, б представлена графическая зависимость времени работы алгоритма $t_{\text{реш}}(N)$. Из графиков видно, что контролируемые параметры имеют тенденцию к возрастанию с ростом количества АС. Выброс в точке $N=30$ для графика $W(N)$ и $N=40$ для графика $t_{\text{реш}}(N)$ являются случайными, которые можно объяснить малым объемом выборки. Броски в области $N < 40$ для графика $t_{\text{реш}}(N)$ связаны с низкой точностью измерения в ОС Windows 2000 временных интервалов около 10 мсек. При $N > 50$ заметно сильное увеличение времени работы алгоритма, которое можно объяснить применением при синтезе первоначальной структуры сети алгоритма решения задачи коммивояжера, сложность которого пропорционально факториалу от размерности решаемой задачи (количество узлов, где необходимо установить ОД).

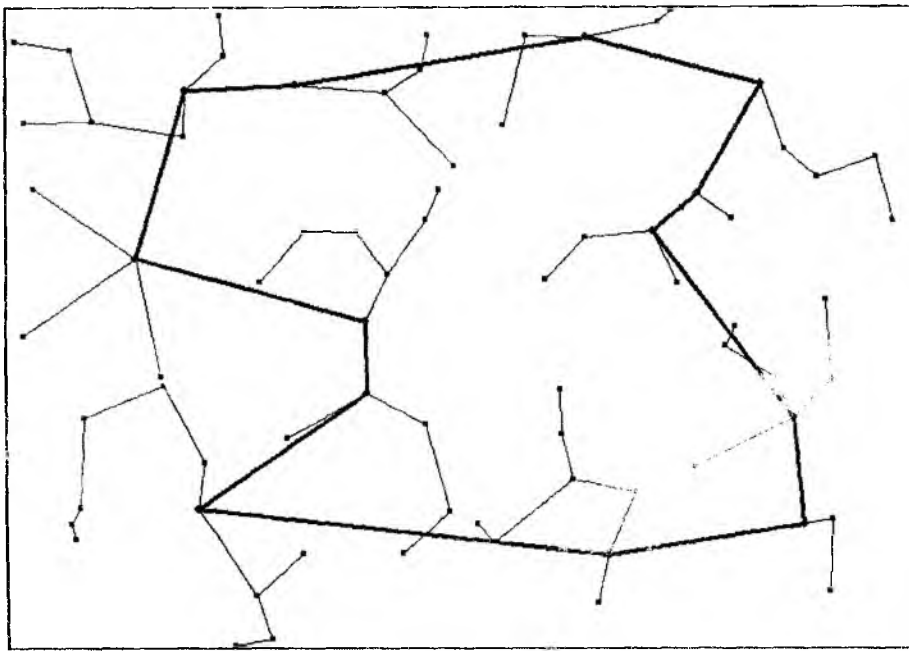


Рис. 4

На рис. 4 представлена результирующая топология сети передачи данных для размера сети $N=75$ узлов, $K=4$, где жирной линией выделен магистральный сегмент, при этом стоимость сети $W=1\ 284\ 562$ ед., $t_{рем}=26,25$ сек. Из рисунка видно как группируются АС в зонах обслуживания ОД, соединяются между собой линиями наименьшей длины как на магистральном участке (магистральное кольцо) так и на абонентском.

Заключение

Предложенная в статье методика позволяет синтезировать оптимальную по критерию стоимости гетерогенную сеть передачи данных с кольцевой структурой на магистральном участке и произвести расчет пропускной способности каналов связи.

Данную методику рекомендуется применять в том случае, когда возникает ситуация в которой невозможно организация сети передачи данных с использованием одной технологии передачи из-за того, что на некоторых участках сети необходима организация каналов с пропускной способностью превышающей максимально возможное значение для выбранной технологии, а использование более производительной технологии экономически нецелесообразно. Сеть передачи данных синтезированная по описанной методике позволит сэкономить средства за счет минимизации расходов на строительство линий связи между узлами сети (отпадает необходимость строительства параллельных линий для увеличения пропускной способности между узлами) и оптимального выбора пропускных способностей каналов.

Предложенная в статье методика выбора мест для установки оборудования доступа в магистральный сегмент сети позволяет разбить задачу синтеза сети передачи данных на две подзадачи: подзадачу синтеза централизованной абонентской сети и подзадачу синтеза транспортной сети передачи данных, для которых применяются ранее известные методики решения данных задач. В результате данная методика может быть легко адаптирована для других комбинаций топологий сетей, например, кольцо на абонентском сегменте и «каждый с каждым» на магистральном, и др.

Список литературы: 1. Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. Киев: Техника, 1986. 168 с. 2. Эвристический алгоритм решения задачи коммивояжера // Тех. кибернетика. ГосИНТИ. 1974. № 2. С. 17-27. 3. Алгоритм решения задачи о размещении концентраторов // Передача информации. ГосИНТИ. 1977. № 46. С. 40-48. 4. Зайченко Ю.П., Швецов А.В. Исследование алгоритмов проектирования структуры абонентской сети передачи данных // Механизация и автоматизация упр. 1982. № 2. С. 18-23.