

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЕТЕЙ С ТЕХНОЛОГИЕЙ АТМ

Е.Ю. ЗАЙЧЕНКО

Рассмотрены задачи анализа функциональных характеристик сетей с технологией АТМ. Сформулирована задача синтеза структуры сетей АТМ при ограничениях на заданные значения показателей качества и описан алгоритм ее решения. Приводятся результаты экспериментальных исследований разработанного программного комплекса анализа и синтеза сетей АТМ «АТМ NETBUILDER».

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появилась новая перспективная технология в телекоммуникационных сетях — технология АТМ (Asynchronous Transfer Mode) — асинхронный режим доставки, которая дает возможность передавать разные виды информации: речь, видео -, аудиоинформацию, сжатые видео- и аудиоинформацию, данные с высокими (155 Мбит/с, 622 Мбит/с) и сверхвысокими (2488 Мбит/с) скоростями.

Используются унифицированные методы и средства передачи разнородной информации. Форум АТМ ввел такие категории передачи [1]:

- с постоянной скоростью — *CBR* (constant bit rate);
- с переменной скоростью — *VBR* (variable bit rate), которая разделяется на две подкатегории: передача в реальном времени (аудио- и видеоинформация) — *VBRrt* и передача в реальном времени — *VBRnrt*;
- с доступной скоростью данных и программ — *ABR* (available bit rate);
- с неустановленной скоростью — передача наименее ответственных данных (электронная почта, служба новостей) — *UBR*.

Для разных категорий трафика форум АТМ ввел также показатели качества обслуживания (QoS):

- *CTD* (Cell Transfer Delay) — задержка в передаче ячеек;
- *CDV* (Cell Delay Variance) — вариация величины задержки;
- *CLR* (Cell Loss Ratio) — вероятность потери ячеек.

Наиболее жесткие значения этих показателей устанавливаются для трафика *CBR*, менее жесткие — для *VBR* и, наконец, наиболее низкие значения — для трафика *ABR*.

Учитывая очень высокие требования к показателям Q_0S , для трафика *CBR* выделяется постоянная часть полосы в каждом канале (физической линии). Если величина трафика *CBR* постепенно снижается, то часть полосы *CBR* остается неиспользуемой. Для *VBR* и *ABR* выделяется общая часть полосы, которая распределяется таким образом: трафик *VBR* занимает большую часть полосы и обслуживается в коммутаторах с высшим относительным приоритетом по дисциплине FIFO, а если в очереди коммутатора нет ячеек *VBR*, то передаются ячейки трафика *ABR*. И, наконец, оставшаяся часть полосы канала (если таковая имеется) используется для передачи трафика *UBR*, причем для него параметры Q_0S не устанавливаются.

При проектировании сетей АТМ возникает проблема анализа, оптимизации характеристик и синтеза структуры сетей АТМ.

В настоящее время отсутствуют теоретические основы расчета, анализа и оптимизации функциональных характеристик и синтеза структуры сетей АТМ. Поэтому цель настоящей статьи — разработка и исследование методов анализа и синтеза сетей АТМ и создание на их основе соответствующего комплекса алгоритмов и программ для задач проектирования сетей с технологией АТМ и обоснования принимаемых проектных решений.

В процессе проектирования новых сетей приходится решать комплекс взаимосвязанных задач, среди которых можно выделить такие функциональные группы:

1. Анализ характеристик сетей АТМ.
2. Анализ показателей живучести сетей.
3. Структурный синтез сетей АТМ.

К группе задач анализа и оптимизации характеристик сетей относятся:

- выбор пропускных способностей каналов связи (ВПС);
- выбор маршрутов передачи и распределения потоков разных категорий (РП);
- комбинированная задача выбора пропускных способностей и распределения потоков (ВПС РП).

К задачам структурного синтеза относятся:

- синтез корпоративной сети с коммутаторами данных;
- синтез структуры глобальной сети при ограничениях на заданные значения Q_0S (показателей качества).

Подчеркнем, что постановка задачи анализа и синтеза сетей должна учитывать специфику сетей АТМ и, в частности, наличие различных категорий сервиса: *CBR*, *VBR* и *ABR*, а также наличие показателей качества для них: *CTD*, *CDV* и *CLR*. Кроме того, для решения задач анализа сетей необходимо прежде всего найти аналитические модели для оценки показателей качества Q_0S в зависимости от выбранных величин пропускных способностей (ПС) и величин потоков.

Перейдем к рассмотрению постановок задач анализа и синтеза сетей АТМ.

Для решения задач анализа и оптимизации характеристик сетей АТМ по Q_0S необходимо было прежде всего разработать аналитические модели оценки показателей качества для разных категорий трафика в зависимости

от интенсивности входных потоков, ПС каналов и распределения потоков по каналам. На основе аппарата систем и сетей массового обслуживания в работе [2] получены такие аналитические модели оценки Q_0S :

для трафика CBR

$$CTD_{CBR}(\{\mu_{rs}\}) = \frac{1}{H_{\Sigma CBR}^{(0)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{CBR}}{n'_{rs} \mu_{rs} - f_{rs}^{CBR}}, \quad (1)$$

$$CLR(\mu_{rs}) = P_k = P_0 \left(\frac{f_{rs}^{CBR}}{\mu_{rs}} \right)^{n'_{rs}} \frac{1}{n'_{rs}!} \left(\frac{f_{rs}^{CBR}}{n'_{rs} \mu_{rs}} \right)^N, \quad (2)$$

где μ_{rs} — пропускная способность каналов связи (КС), выделенная под трафик CBR ; n'_{rs} — число базовых цифровых каналов (64 кбит/с), выделенных под трафик CBR в КС (r,s) ; f_{rs}^{CBR} — поток трафика CBR в КС (r,s) ; N — размер буфера коммутатора АТМ для ячеек трафика CBR ; P_0 — нормирующий множитель.

Рассмотрим показатели качества трафиков VBR и ABR , которые используют общую полосу, причем трафик VBR является более приоритетным. Согласно работе [2], средние задержки в КС (r,s)

для трафика VBR

$$t_{rs}^{VBR} = \frac{\lambda_{rs}^{\Sigma}}{\mu_{rs}(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)})} = \frac{f_{rs}^{(1)} + f_{rs}^{(2)}}{\mu_{rs}(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)})}, \quad (3)$$

для трафика ABR

$$t_{rs}^{ABR} = \frac{f_{rs}^{(1)} + f_{rs}^{(2)}}{(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)})(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)} - f_{rs}^{(2)})}, \quad (4)$$

и величины средних задержек в сети АТМ в целом, усредненные по всем парам узлов:

для трафика VBR

$$T_{cp}^{VBR} = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(1)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{(1)}(f_{rs}^{(1)} + f_{rs}^{(2)})}{\mu_{rs}(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)})}, \quad (5)$$

для трафика ABR

$$T_{cp}^{ABR} = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(2)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{(2)}(f_{rs}^{(1)} + f_{rs}^{(2)})}{(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)})(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)} - f_{rs}^{(2)})}, \quad (6)$$

где $f_{rs}^{(1)}$, $f_{rs}^{(2)}$ — величины потока (трафика) в канале (r,s) соответственно категориям VBR и ABR ; $H_{\Sigma}^{(1)}$, $H_{\Sigma}^{(2)}$ — общая величина внешнего потока соответственно для VBR и ABR .

На основе полученных аналитических моделей для оценки показателей качества (Q_0S) в работах [2, 3] сформулированы и решаются описанные ниже задачи анализа и оптимизации характеристик сетей АТМ.

1. ЗАДАЧА ВПС И АЛГОРИТМ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Постановка задачи

Задана структура сети АТМ в виде графа $G = (X, E)$, где $X = \{x_j\}_{j=1, n}$ — узлы сети (коммутаторы АТМ) и $E = \{(r, s)\}$ — множество дуг (каналов связи). Имеем возможный набор пропускных способностей (скоростей передачи) КС $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, из которых осуществляется выбор. Заметим, что для сетей АТМ эти скорости кратны базовой скорости цифрового канала DS_0 64 Кбит/с или канала DS_1 — 1,544 Мбит/с.

Известны также удельные стоимости каналов разной пропускной способности $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$. Тогда стоимость канала связи длиной $l_{i,j}$ и скоростью передачи d_k равняется $C_{ij}^{\text{пер}}(d_k, l_{ij}) = C_k l_{ij}$.

Пусть также задана матрица требований $H = \|h_{i,j}\|$ в передаче трафика CBR , где h_{ij} — интенсивность потока, которую необходимо передать от узла i в узел j (Мбит/с). Кроме того, пусть при заданных виртуальных путях передачи трафика $CBR(\pi_{ij})$ между всеми узлами определена величина общего потока CBR в канале связи (r, s) $f_{rs}^{(1)}$ и вектор потока $F^{(1)} = [f_{rs}^{(1)}]$.

Необходимо выбрать такие пропускные способности всех каналов связи $\{\mu_{rs}\} = M$, при которых стоимость сети CBR будет минимальной

$$C_{\Sigma}(M) = \sum_{(r,s) \in E} C_{rs}^{\text{пер}}(\mu_{rs}), \quad (7)$$

и при этом должны выполняться такие ограничения:

на допустимую среднюю вероятность потери ячеек

$$CLR = \frac{1}{m} \sum_{(r,s)} CLR_{rs}(\mu_{rs}, f_{rs}) \leq CLR_{\text{зад}}; \quad (8)$$

на допустимую задержку ячеек CBR , среднюю по сети

$$T_{\text{ср}}^{CBR}(\{\mu_{rs}\}, \{f_{rs}\}) \leq T_{\text{зад}}^{CBR} \quad (9)$$

и очевидных условиях $f_{rs} < \mu_{rs}; (r, s) \in E, \mu_{rs} \in D$.

Здесь $CLR_{\text{зад}}$ — заданный уровень (%) потерь ячеек CBR ; $T_{\text{зад}}^{CBR}$ — заданная средняя задержка ячеек CBR в сети.

Выбор пропускных способностей каналов для трафиков VBR и ABR

Рассмотрим теперь постановку задачи ВПС для трафиков VBR и ABR [3].

Пусть заданы матрицы требований в передаче трафика VBR $H_2^{VBR} = \|h_{ij}^{(2)}\|_{i,j=1, n}$ и ABR $H_3^{ABR} = \|h_{ij}^{(3)}\|_{i,j=1, n}$, и при заданных виртуальных

каналах (путях) поток ячеек *VBR* равняется $f_{rs}^{(1)}$, а ячеек *ABR* — $f_{rs}^{(2)}$. Пусть выбор осуществляется из того же самого набора пропускных способностей $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, что и раньше. Надо найти такие ПС $\{\mu_{rs}\}$ этих каналов, а также их часть, занятую трафиком *VBR*, при которых обеспечивается

$$\min C_{\Sigma} = \sum_{(r,s) \in E} C_{rs}^{\text{пер}}(\mu_{rs}) \quad (10)$$

при выполнении ограничений на показатели качества обслуживания трафиков *VBR* и *ABR*

$$\overline{CLR}_{VBR}(M, F^{(1)}) = \frac{1}{m} \sum_{(r,s) \in E} CLR_{rs}(\mu_{rs}, f_{rs}^{(1)}) \leq CLR_{\text{зад}}^{VBR}, \quad (11)$$

$$T_{\text{сп}}^{VBR}(M, F_{VBR}^{(1)}) \leq \overline{T}_{\text{зад}}^{VBR}, \quad (12)$$

$$T_{\text{сп}}^{ABR}(M, F_{ABR}^{(2)} / F_{VBR}^{(1)}) \leq \overline{T}_{\text{зад}}^{ABR}, \quad (13)$$

где для расчета задержек используем модель СМО $M/M/n_{rs}/N_{rs}$ с двумя потоками и приоритетным обслуживанием с относительными приоритетами и дисциплиной FIFO (5), (6). Алгоритм ее решения приведен в работе [3].

2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ В СЕТЯХ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ATM

Постановка задачи

Задана структура сети в виде орграфа $G = (X, E)$, $X = \{x_j\}$, $j = \overline{1, n}$ — множество узлов сети — коммутаторов; $E = \{(r, s)\}$ — множество каналов связи (дуг).

Заданы также матрицы требований для передачи трафика *VBR*

$$H_{VBR}^{(1)} = \left\| h_{ij}^{(1)} \right\|_{i,j=\overline{1,n}}$$

и трафика *ABR*

$$H_{ABR}^{(2)} = \left\| h_{ij}^{(2)} \right\|_{i,j=\overline{1,n}},$$

где $h_{ij}^{(1)}$, $h_{ij}^{(2)}$ — интенсивность потока ячеек (cell/c), который необходимо передать от узла i к узлу j . Для *VBR* и *ABR* заданы соответственно пропускные способности каналов $\mu_{rs} = n_{rs}\mu$, где n_{rs} — количество цифровых каналов типа DS_0 ($\mu = 64$ Кбит/с) или DS_1 ($\mu = 1,544$ Мбит/с), организованных в КС (r, s) .

Нужно выбрать такие маршруты передачи и найти распределение потоков для трафиков VBR $F^{(1)} = [f_{rs}^{(1)}]$ и ABR $F^{(2)} = [f_{rs}^{(2)}]$, при которых обеспечивался бы минимум вероятности потери ячеек VBR

$$\min CLR_{VBR}(F^{(1)}) \quad (14)$$

при ограничении на среднюю задержку ячеек VBR

$$T_{cp}^{VBR}(F^{(1)}) \leq T_{зад}^{VBR} \quad (15)$$

на среднюю задержку ячеек ABR

$$T_{cp}^{ABR}(F^{(2)} | F^{(1)}) \leq T_{зад}^{ABR}$$

и очевидных условиях

$$f_{rs}^1 + f_{rs}^2 < \mu_{rs} = n_{rs} \mu, \quad \forall (r, s) \in E.$$

Для решения задачи РП предложен модифицированный алгоритм РП, описанный в работе [2].

3. ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРОПУСКНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ (ВПС РП)

Постановка задачи

Рассмотрим теперь комбинированную задачу ВПС РП.

Задана структура сети АТМ в виде графа $G = (X, E)$, где $X = \{x_j\}_{j=1, n}$ — узлы сети (коммутаторы АТМ) и $E = \{(r, s)\}$ — множество дуг (каналов связи). Имеем возможный набор пропускных способностей (скоростей передачи) каналов связи $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, из которых осуществляется выбор, известные удельные стоимости каналов разной пропускной способности $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$. Пусть также задана матрица требований $H_{CBR} = \|h_{ij}\|$ для передачи трафика CBR , где h_{ij} — интенсивность потока, который необходимо передать от узла i в узел j (Мбит/с). Заданы также матрицы требований для передачи трафика VBR $H_{VBR}^{(1)} = \|h_{ij}^{(1)}\|_{i, j=1, n}$ и трафика ABR $H_{ABR}^{(2)} = \|h_{ij}^{(2)}\|_{i, j=1, n}$.

Необходимо выбрать пропускные способности всех каналов связи $\{\mu_{rs}\} = M$, часть общей полосы каналов, выделенную под трафики соответственно CBR , VBR , ABR , а также найти такое распределение потоков для трафиков CBR, VBR, ABR , для которых стоимость сети будет минимальной

$$C_{\Sigma}(M) = \sum_{(r,s) \in E} C_{rs}^{\text{пер}}(\mu_{rs}) \quad (16)$$

и при этом будут выполняться ограничения на допустимую среднюю вероятность потери ячеек

$$CLR^{CBR} = \frac{1}{m} \sum_{(r,s)} CLR_{rs}(\mu_{rs}, f_{rs}) \leq CLR_{\text{зад}}^{CBR}, \quad (17)$$

на допустимую задержку ячеек CBR , среднюю по сети

$$T_{\text{cp}}^{CBR}(\{\mu_{rs}\}, \{f_{rs}\}) \leq T_{\text{зад}}^{CBR},$$

а также на показатели качества обслуживания трафиков VBR и ABR

$$\overline{CLR}_{VBR}(M, F^{(1)}) = \frac{1}{m} \sum_{(r,s) \in E} CLR_{rs}(\mu_{rs}, f_{rs}^{(1)}) \leq CLR_{\text{зад}}^{VBR},$$

$$T_{\text{cp}}^{VBR}(M, F_{VBR}^{(1)}) \leq \overline{T}_{\text{зад}}^{VBR}, \quad (18)$$

$$T_{\text{cp}}^{ABR}(M, F_{VBR}^{(1)} | F_{ABR}^{(2)}) \leq \overline{T}_{\text{зад}}^{ABR} \quad (19)$$

и очевидных условиях $f_{rs} < \mu_{rs}$; $(r,s) \in E$; $\mu_{rs} \in D$.

Описание алгоритма ВПС РП

Учитывая, что для трафика CBR выделяется постоянная полоса, независимо от текущего потока и от трафиков VBR и ABR , а под трафики VBR , ABR выделяется общая часть полосы канала, целесообразно рассмотреть алгоритм решения данной задачи отдельно для трафика CBR , а также для смеси трафиков VBR и ABR .

На предварительном этапе находим начальное распределение трафиков VBR и ABR $F_{VBR}(0) = [f_{rs}^{(1)}(0)]$, $F_{ABR}(0) = [f_{rs}^{(2)}(0)]$. Далее решаем задачу ВПС и находим начальные пропускные способности всех каналов $M^1(0) = \{\mu_{rs}^{(1)}(0)\}$. Вычисляем начальную стоимость сети $C_{\Sigma}(0) = \sum_{(r,s) \in E} c_{r,s}(\mu_{rs}(0))$ и

переходим к основному этапу [2].

Основной этап, $(k+1)$ -я итерация

Итак, пусть найдены пропускные способности всех каналов $[\mu_{rs}(k)]$, распределение потоков $F_{VBR}(k)$, $F_{ABR}(k)$ и стоимость сети $C_{\Sigma}(k)$.

1. При заданных ПС $\mu_{rs}(k)$ решаем задачу РП для смеси трафиков VBR , ABR и находим такое распределение потоков $F_{VBR}(k+1)$ и $F_{ABR}(k+1)$, для которых обеспечивается минимум $CLR_{VBR}(F_{VBR}(k+1))$ при ограничениях

$$T_{\text{cp}}^{VBR}(M, F_{VBR}^{(1)}) \leq \bar{T}_{\text{зад}}^{VBR};$$

$$T_{\text{cp}}^{ABR}(M, F_{ABR}^{(2)} | F_{VBR}^{(2)}) \leq \bar{T}_{\text{зад}}^{ABR}. \quad (20)$$

Для этого используем алгоритм РП, описанный в работе [2].

2. При найденном распределении потоков $F_{VBR}(k+1)$ и $F_{ABR}(k+1)$ решаем задачу ВПС и находим такие значения пропускных способностей $\{\mu_{rs}(k+1)\}$, для которых достигается

$$\min C_{\Sigma} = \sum_{(r,s) \in E} C_{rs}^{\text{пер}}(\mu_{rs}) \quad (21)$$

при выполнении ограничений на показатели качества обслуживания трафиков VBR и ABR $T_{\text{cp}}^{VBR}(M, F_{VBR}^{(1)}) \leq \bar{T}_{\text{зад}}^{VBR}$ и $T_{\text{cp}}^{ABR}(M, F_{VBR}^{(2)} | F_{ABR}^{(1)}) \leq \bar{T}_{\text{зад}}^{ABR}$.

3. Вычисляем значения критерия $C_{\Sigma}(k+1) = C_{\Sigma}(\mu_{rs}(k+1))$. Сравниваем. Если $|C_{\Sigma}(k+1) - C_{\Sigma}(k)| \leq \varepsilon$, то конец работы алгоритма, иначе переходим к $(k+2)$ -й итерации.

Таким образом, в результате решения задачи ВПС РП находим одновременно пропускные способности всех КС (из заданного набора), а также распределение потоков всех категорий такое, при котором стоимость сети минимальна при заданных ограничениях.

4. СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СЕТЕЙ С ТЕХНОЛОГИЕЙ АТМ

Одной из важнейших задач, которые возникают при проектировании телекоммуникационных сетей, является задача выбора (синтеза) структуры сети. Эта задача рассматривалась многими авторами [4, 5, 6]. Традиционно она формулируется как задача выбора рациональной или оптимальной структуры коммуникационной сети, связывающей все источники и потребители информации. Критерием качества обычно выступает стоимость коммуникационной сети (или приведенные затраты на ее создание), а как ограничение — средняя задержка в доставке информации. Как дополнительные ограничения могут быть использованы время задержки между заданными парами узлов (конечных пользователей сети), а также ограничение на показатели живучести сети [5]. Переход к новой коммуникационной технологии АТМ с разнородными видами трафика и соответствующими значениями показателей качества не позволяет использовать традиционные модели и алгоритмы синтеза для решения задач структурного синтеза сетей АТМ.

Поэтому данная работа посвящена проблеме синтеза структуры сетей АТМ с учетом установленных ограничений на показатели качества QS_0 для различных категорий сервиса.

4.1. Постановка и математическая модель задачи синтеза структуры сетей ATM

Заданы трафики конечных пользователей (конечные станции ATM), коммутаторов сети ATM, матрицы требований для передачи информации:

$$CBR \ H_{CBR}^1 = \left\| h_{ij}^{CBR} \right\|_{i,j=(1,n)};$$

$$VBR \ H_{VBR}^1 = \left\| h_{ij}^{VBR} \right\|_{i,j=(1,n)};$$

$$ABR \ H_{ABR}^3 = \left\| h_{ij}^{ABR} \right\|_{i,j=(1,n)};$$

набор пропускных способностей КС сети ATM $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ и их удельных стоимостей $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ на одну единицу длины. Нужно найти такую структуру сети $E = \{(r, s)\}$, пропускные способности всех КС $\{\mu_{rs}\}$ и распределение всех потоков трафиков CBR, VBR и ABR, для которых минимизируется общая стоимость сети при ограничениях на заданные показатели качества (QS_0) разных типов трафика: $T_{зад}^{CBR}$, $T_{зад}^{VBR}$ и $T_{зад}^{ABR}$, $CLR_{зад}^{VBR}$, $CLR_{зад}^{CBR}$.

Решение этой задачи базируется на алгоритмах анализа и оптимизации характеристик сетей ATM и, в частности, на алгоритме выбора маршрутов и РП, предложенного в работе [2], а также алгоритме оптимального выбора пропускных способностей (ВПС) каналов сети ATM [3].

Математическая модель данной задачи синтеза имеет следующий вид.

Найти такую структуру сети $E^0 = \{(r, s)\}$ и пропускные способности $\{\mu_{rs} = M\}$, распределение потоков трафиков CBR $\{f_{rs}^{CBR}\}$, VBR- $\{f_{rs}^{VBR}\}$ и ABR — $\{f_{rs}^{ABR}\}$, при которых обеспечивается

$$\min_{E^0, F, M} C_{\Sigma} = \sum_{(r,s) \in E} C_{rs}(\mu_{rs}^0) \quad (22)$$

при условиях

$$CLR_{CBR}(M^{CBR}, F_0^{CBR}) \leq CLR_{зад}^{CBR}, \quad (23)$$

$$T_{сп}^{CBR}(M^{CBR}, F_0^{CBR}) \leq T_{зад}^{CBR}, \quad (24)$$

$$T_{сп}^{VBR}(M_1, F_1^{VBR}) \leq T_{зад}^{VBR}, \quad (25)$$

$$CRL_{VBR}(M_1, F_2^{ABR}, F_1^{VBR}) \leq CLR_{зад}^{VBR}, \quad (26)$$

$$T_{сп}^{ABR}(M_1, F_2^{ABR}, F_1^{VBR}) \leq T_{зад}^{ABR}, \quad (27)$$

где $f_{rs}^{(1)} + f_{rs}^{(2)} \leq n_{rs} \mu$, $\forall (r, s) \in E^0$, потоки $f_{rs}^{CBR} = f_{rs}^{(0)}$, $f_{rs}^{VBR} = f_{rs}^{(1)}$ и $f_{rs}^{ABR} = f_{rs}^{(2)}$ представляют собой соответственно многопродуктовые потоки трафиков *CBR*, *VBR* и *ABR*, совместимые с матрицами H_1^{CBR} , H_2^{VBR} и H_3^{ABR} .

Особенности данной задачи синтеза состоят в следующем.

1. Наличие большого числа ограничений (23) – (27).
2. Поскольку в связи со спецификой трафика *CBR* для него полоса пропускной способности в любом КС выделяется постоянно и независимо от распределений потока, то это позволяет решать задачи анализа и оптимизации для трафика *CBR* независимо от потоков *VBR* и *ABR*, т. е. выделить эту задачу в отдельную задачу синтеза.
3. Задача синтеза структуры сети для передачи трафиков *VBR* и *ABR* должна решаться совместно для обоих трафиков с учетом более высокого приоритета трафика *VBR*.

4.2. Алгоритм синтеза структуры сети АТМ при ограничениях на показатели качества (Q_0S)

Учитывая многоэкстремальный комбинаторный характер задачи синтеза (22) – (27), для ее решения предлагается генетический алгоритм глобальной оптимизации [10].

На предварительном этапе проводим синтез начального кратчайшего связного дерева D_0 , которое связывает все узлы между собой. Для этих целей используется алгоритм синтеза, описанный в работе [4]. Далее структура D_0 случайным образом дополняется некоторыми каналами к связности $КС = 2$. При этом генерируется также случайным образом популяция из трех начальных структур E_0 , E_1 , E_2 .

Переходим на первую итерацию оптимизации второго этапа, на которой генерируется случайным образом популяция из трех начальных структур $E_1(0)$, $E_2(0)$, $E_3(0)$.

Описание (k+1)-й итерации

Пусть в памяти системы сохраняется последовательность структур $E_1(k)$, $E_2(k)$, $E_3(k) = \Pi(k)$, которым отвечают значения критерия $C_\Sigma(E_1(k))$, $C_\Sigma(E_2(k))$, $C_\Sigma(E_3(k))$.

Случайным образом, с вероятностями, обратно пропорциональными $C_\Sigma(E_i(k))$, выбирается структура $E_i(k)$.

Для нее определяется множество каналов-претендентов на удаление.

$P_{уд}^i(k) = \{(r, s)\}$ — это те каналы, удаление которых не нарушает связности сети $E_i(k)$.

1. Для любого из КС (r, s) вычисляется показатель неэкономичности

$$q_{rs}^{(k)} = \frac{C_{rs}(\mu_{rs} - f_{rs}^{(k)})}{\mu_{rs}},$$

где C_{rs} — стоимость КС (r, s) ; μ_{rs} — его ПС; $f_{rs}^{(k)}$ — поток в КС (r, s) .

2. Вычисляются вероятности удаления КС (r, s)

$$P_{rs} = \frac{q_{rs}^{(k)}}{\sum_{(r,s) \in P_{\text{уд}}} q_{rs}^{(k)}}.$$

3. Определяется множество каналов $P_{\text{об}}^i(k) = \{(i, j)\}$ претендентов на введение в структуру $E_i(k)$.

$$P_{\text{об}}^i = \{(i, j)\}_{i, j=1, \overline{n}} \setminus E_i(k).$$

4. Для любого КС $(i, j) \in P_{\text{об}}^i$ вычисляется экономический эффект от его введения

$$G_{ij}^{(e)} = (h_{ij}^{(1)} + h_{ji}^{(1)}) \Delta C_{ij},$$

где $\Delta C_{ij} = C(Ш_{ij}) - C_{ij}(h_{ij} + h_{ji})$, $C(Ш_{ij})$ — стоимость передачи информации между несмежными узлами (i, j) в сети $E^i(k)$ по пути $Ш_{ij}$; $C_{ij}(h_{ij} + h_{ji})$ — стоимость введения прямого канала (i, j) .

5. С помощью случайного механизма выбирается один из механизмов изменения Γ_i с вероятностью $P(\Gamma_i)$ $i=1, 2$, где Γ_1 — режим изменения: удалить неэкономичный канал из структуры $E^i(k)$; Γ_2 — ввести новый канал в структуру $E^i(k)$.

6. Если избранный режим Γ_1 , то, используя вероятностный механизм, определяем с вероятностью P_{rs} канал, который удаляется из сети. Получаем структуру $E_i'(k)$.

6.1. Для структуры $E_i'(k)$ решаем задачу ВПС РП и находим новые ПС всех каналов $\{(\mu'_{rs}(k))\}$ и новое распределение потоков $\{f_{rs}^{(k)}\}$, для чего используем алгоритм ВПС РП.

6.2. Определяем величину критерия $C_{\Sigma}(E_i'(k))$ и сравниваем $C_{\Sigma}(E_i'(k))$ и $C_{\Sigma}(E_i(k))$. Если $C_{\Sigma}(E_i'(k)) < C_{\Sigma}(E_i(k))$, то заменяем структуру E_i на $E_i'(k)$. Положим $E_i(k+1) = E_i'(k)$ и записываем в последовательность локально-эффективных структур $\Pi_{\varepsilon}(E_i(k))$. В противоположном случае удаляем КС (r, s) из множества претендентов на удаление: $P_{\text{уд}}^H(k) = P_{\text{уд}}(k) \setminus r, s$ и снова переходим на выполнение k -й итерации.

6.3. Корректируем вероятности выбора каналов на удаление: P_{rs}^H с учетом множества $P_{\text{уд}}^H(k)$.

7. Если же избран режим Γ_2 (введение ребра), то последовательность шагов будет аналогичная.

7.1. С вероятностью $P_{ij} = \frac{G_{ij}^{BB}}{\sum_{(i,j) \in P_{BB}} G_{ij}^{BB}}$ выбираем для введения канал (i, j) .

Получаем структуру $E_i''(k) = E_i(k) \cup (i_1, j_1)$.

7.2. Решаем задачу ВПС РП для структуры $E_i''(k)$ и находим новое распределение потоков РП в $[f_{rs}''(k)]$ и пропускные способности всех КС $\{\mu_{rs}''(k)\}$.

7.3. Сравниваем значения критерия $C_\Sigma(E_i''(k))$ с $C_\Sigma(E_i(k))$. Если $C_\Sigma(E_i''(k)) < C_\Sigma(E_i(k))$, то фиксируем новую структуру $E_i'(k) = E_i''(k)$, записываем ее в память в последовательность $\Pi(E_i(k))$. Конец итерации.

В противоположном случае восстанавливаем исходную структуру $E_i(k)$, удаляем канал (i, j) из множества претендентов $P_{BB}^H(k) = P_{BB} \setminus (i, j)$ и снова переходим на шаг $(k+1)$ -й итерации.

Указанную последовательность шагов на $(k+1)$ -й итерации повторяем до тех пор, пока не получим новую структуру $E_i'(k)$, для которой будет выполняться условие локальной оптимизации $C_\Sigma(E_i''(k)) < C_\Sigma(E_i(k))$. В этом случае записываем новую структуру $E_i'(k)$ вместо структуры $E_i(k)$ в последовательность $\Pi(E_i(k))$. Конец итерации.

В противоположном случае выбираем другую структуру из последовательности $\Pi(k) - E_{i_1}(k)$, $i=2,3$ с вероятностями

$$P_{i_1} = \frac{C_\Sigma(E_{i_1}(k))^{-1}}{\sum_i C_\Sigma(E_i(k))^{-1}}.$$

Повторяем с ней описанные шаги 1–7, и если $C_\Sigma(E_{i_1}'(k+1)) < C_\Sigma(E_{i_1}(k))$, то фиксируем новую структуру в памяти системы.

Процесс синтеза на основе генетического алгоритма повторяется до тех пор, пока не придем к случаю $E_i(k+1) < E_i(k)$, и тогда фиксируем новую структуру $E_i'(k+1)$ вместо исходной в последовательности локально-оптимальных структур $\Pi(E_i(k))$. Конец итерации.

В противном случае, если исчерпаны все возможные варианты синтеза новой более экономичной структуры $E_i(k+1)$, то Stop, найдена искомая оптимальная структура глобальной сети АТМ. Конец работы алгоритма.

Замечание. Использование генетического алгоритма для оптимизации структуры сети АТМ обеспечивает возможность достижения глобального оптимального решения.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ

В соответствии с предложенными алгоритмами анализа характеристик и синтеза структуры сетей с технологией ATM был разработан программный комплекс ATM NETBUILDER [12]. Функциональная структура комплекса приведена на рис. 1.

Здесь указаны функциональные взаимосвязи и информационные интерфейсы между всеми программными модулями. Проведены многочисленные экспериментальные исследования алгоритмов и программ анализа характеристик и синтеза структуры сетей. Некоторые из полученных результатов приведены ниже.

Задача выбора маршрутов и оптимального распределения потоков (РП). Данный алгоритм позволяет найти оптимальное распределение потоков для трафиков *CBR*, *VBR* и *ABR* по критерию минимизации вероятности потери ячеек высокоприоритетного трафика *VBR* при ограничениях на показатели качества (CTD) трафиков *VBR* и *ABR*. Проведены экспериментальные исследования разработанного алгоритма и программы [2]. Размещение узлов исследуемой сети ATM приводится в таблице.

Характеристика узлов сети

Номер узла	Координаты		Тип узла	Город
	<i>x</i>	<i>y</i>		
0	31	33,5	1	Киев
1	47	23	1	Днепропетровск
2	51	32	1	Харьков
3	57,5	21	1	Донецк
4	31,5	11,5	1	Одесса
5	47,5	19,5	1	Запорожье
6	1,5	25,5	1	Ужгород
7	8	31,5	1	Львов
8	16	35	1	Ровно
9	14,5	22,5	1	Черновцы
10	24,5	33	1	Житомир
11	23,5	27	1	Винница
12	33,5	39,5	1	Чернигов
13	38,5	13	1	Херсон
14	46	36,5	1	Сумы

В экспериментах задавались следующие параметры коммуникационной сети: пропускная способность одного цифрового канала, который входит в линию связи $\mu = 64$ Кбит/с, память в буфере коммутатора 2,5 Кбит/с. Ограничение на среднюю сетевую задержку трафика *VBR* составляет 20мс, а на среднюю задержку трафика *ABR* — 50мс.

В экспериментах исследовались зависимости средней вероятности потери ячеек и средних задержек трафиков *VBR* и *ABR* от величины входного трафика *VBR*.

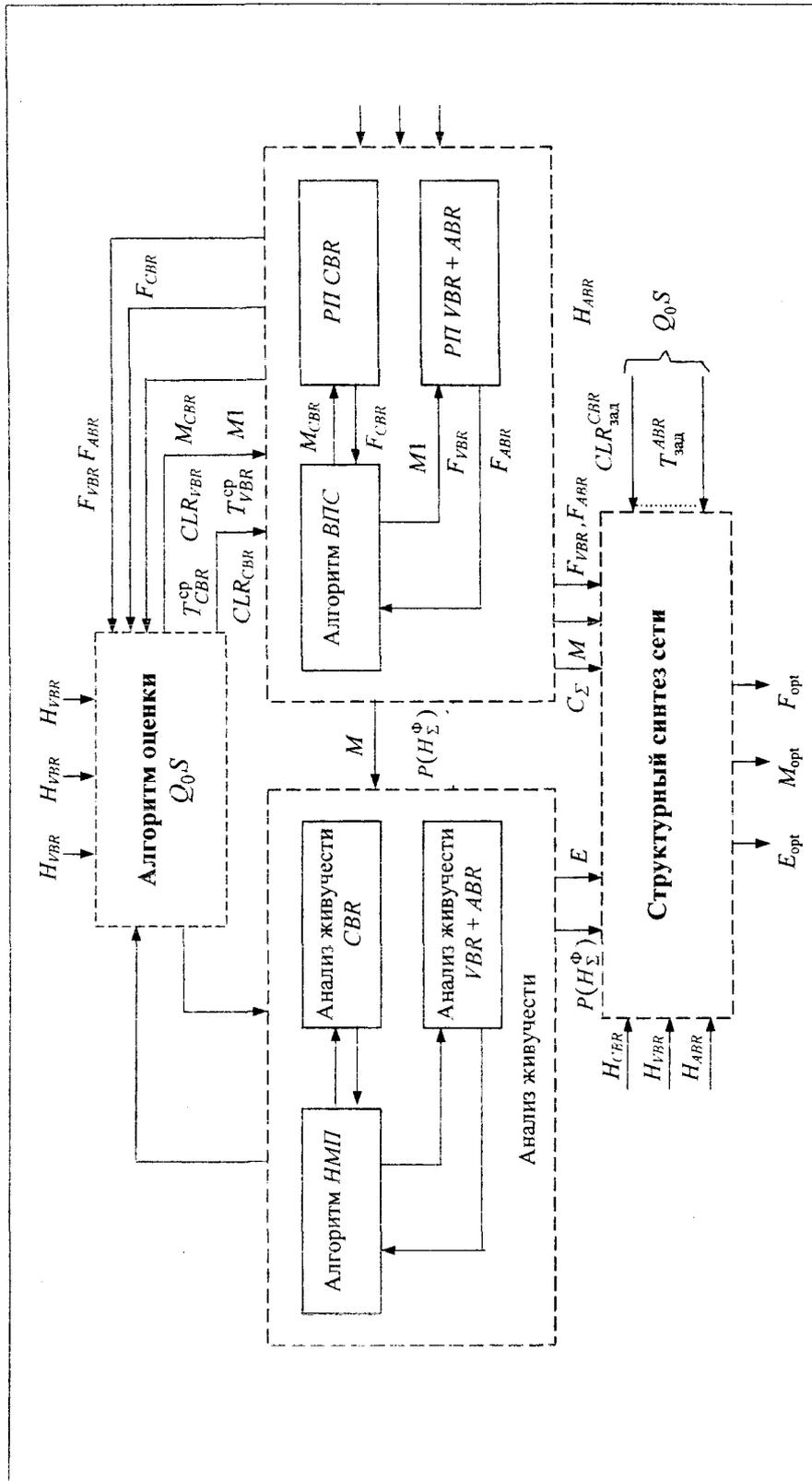


Рис. 1. Структурная схема комплекса алгоритмов анализа и синтеза сетей

Будем варьировать объём трафика VBR , изменяя коэффициент k_{VBR} в диапазоне $[3,5 - 4,5]$. $H^{VBR}(k) = k_{VBR} * H^{VBR}$.

На рис. 2 показана зависимость вероятности потери ячеек типа VBR , на рис. 3 — зависимость средней задержки трафика VBR , а на рис. 4 — зависимость средней задержки трафика ABR от изменения величины k_{VBR} .

Проанализировав эти графики, можно сделать вывод: зависимость CLP_{VBR} при изменении k_{VBR} нелинейная, средняя задержка T_{VBR} изменяется по линейному закону, а средняя задержка для трафика ABR изменяется по экспоненциальному закону. Далее были проведены экспериментальные исследования изменения показателей T_{ABR} от интенсивности трафика ABR (рис. 5).

Проведенные исследования показали, что средняя вероятность потери ячеек трафика VBR не зависит от величины ABR , а средняя задержка VBR слабо зависит от величины трафика ABR (k_{ABR}).

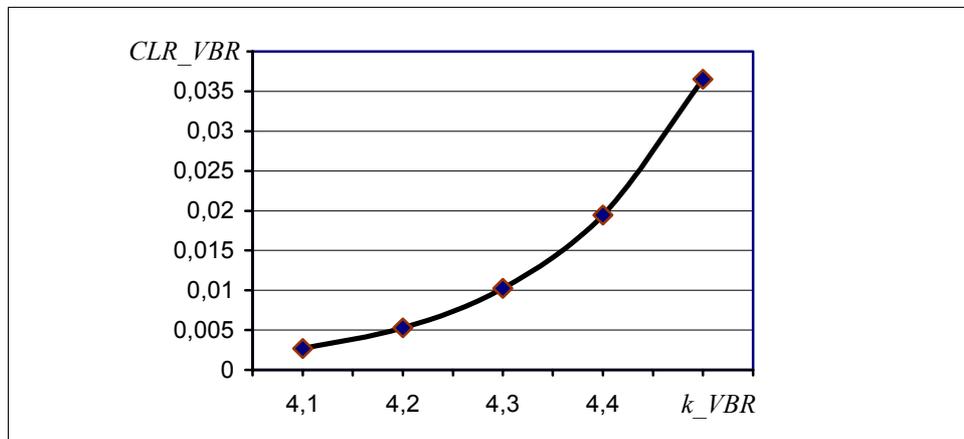


Рис. 2. Зависимость CLP_{VBR} от величины k_{VBR}

Это легко объясняется тем, что трафик ABR является менее приоритетным, чем VBR . Что же касается средней задержки ABR , то она резко возрастает (по нелинейному закону) и при значении $k_{ABR} = 15$ трафик ABR достигает такой интенсивности, что средняя задержка не может быть оптимизирована так, чтобы удовлетворить введенному на нее ограничению $T_{ABR} \leq 0,05$ с.

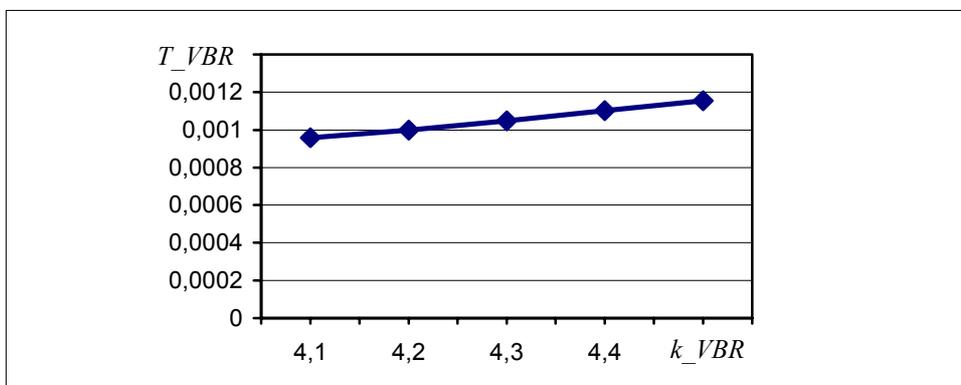


Рис. 3. Зависимость T_{VBR} от k_{VBR}

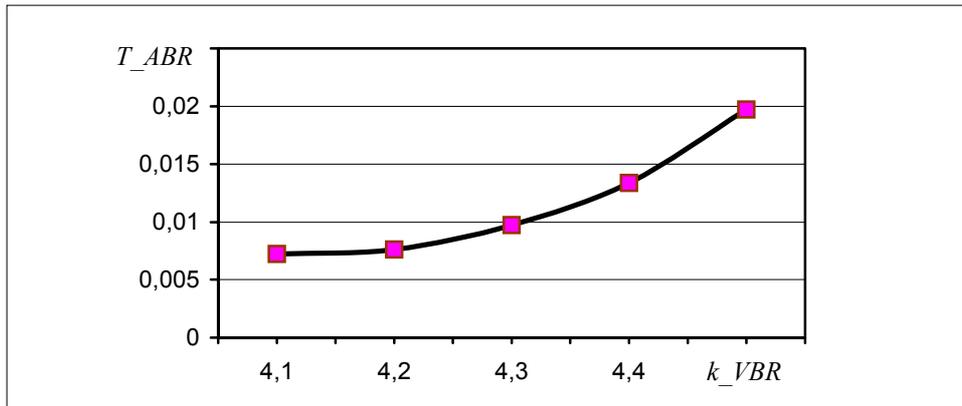


Рис. 4. Зависимость T_{ABR} от величины k_{VBR}

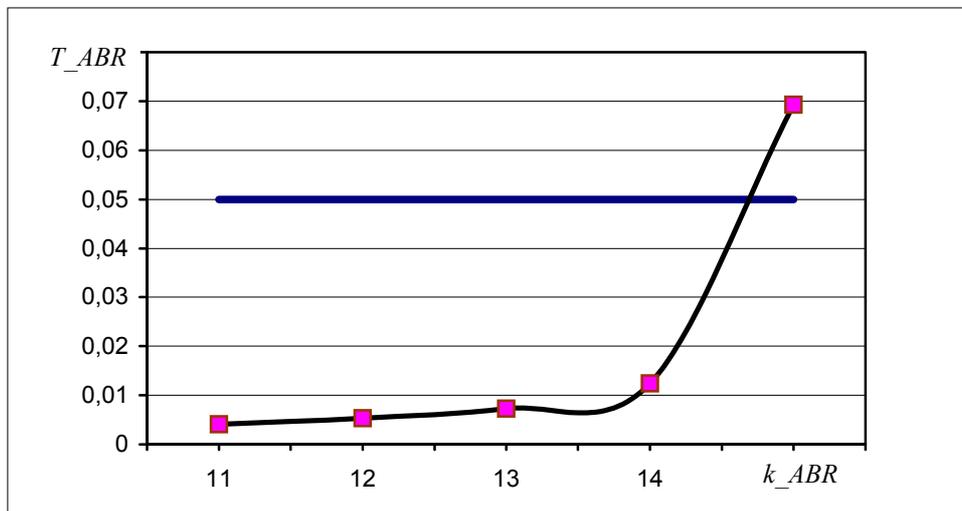


Рис. 5. Зависимость T_{ABR} от величины k_{ABR}

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМА СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ГЛОБАЛЬНЫХ СЕТЕЙ АТМ

Задача синтеза решалась для сети АТМ с набором узлов (см. таблицу). Были заданы такие вероятности потери ячеек и допустимые задержки (ограничения на Q_0S):

$$CLR_{VBR}^{зад} = 0,18; T_{VBR}^{зад} = 0,15c; T_{ABR}^{зад} = 0,5c.$$

В результате работы программы синтезированы начальная ($D0$) (рис. 6) и конечная оптимальная структура сети АТМ (рис. 7).

При этом получены следующие показатели вероятности потери ячеек и средней задержки для синтезированной структуры:

$$CLR_{VBR} = 0,17034; T_{VBR} = 0,004171c; T_{ABR} = 0,047317c.$$

Стоимость начальной сети D_0 составляет 144113518,5 у.е., конечной оптимальной синтезированной структуры — 34153987,82 у.е. Таким образом, в результате применения программы оптимизации структуры стоимость сети сокращена на 70%.

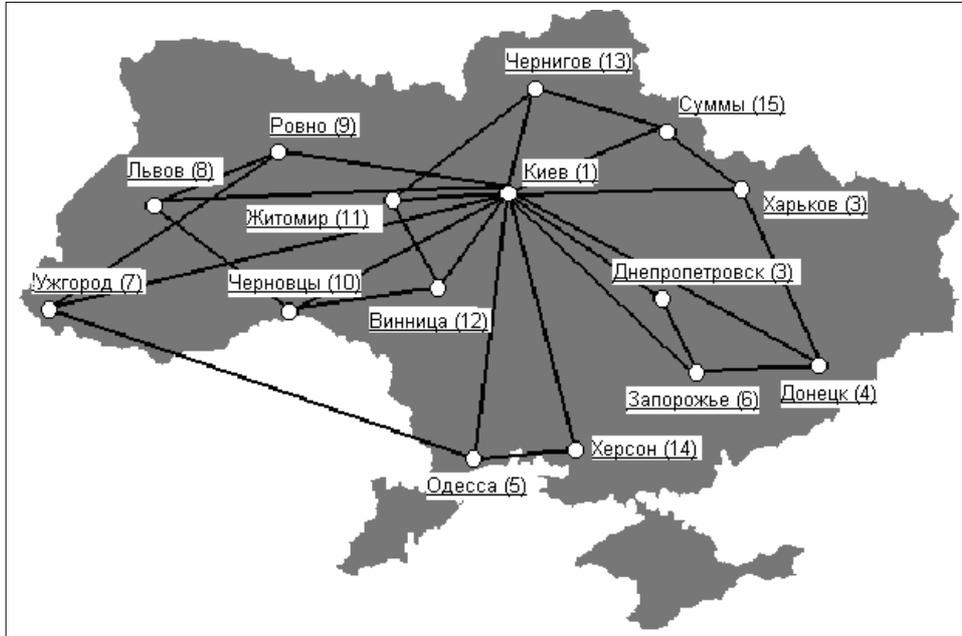


Рис.6. Начальная структура D_0

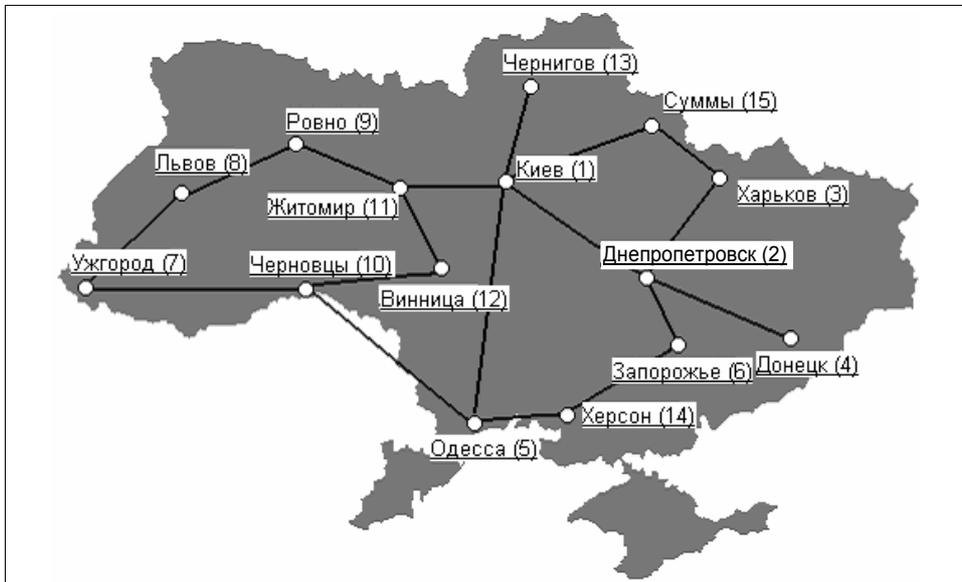


Рис. 7. Конечная синтезированная структура сети

В последующих экспериментах решалась задача структурного синтеза сети при вариации матрицы требований H_{VBR} . На рис. 8 приводится итоговая структура сети ATM для коэффициента увеличения потока VBR

$k_{VBR} = 2$, на рис. 9 — гистограмма распределения загрузок каналов связи, на рис. 10 — синтезированная структура для $k_{VBR} = 5$, на рис. 11 — соответствующая гистограмма распределения загрузок каналов.

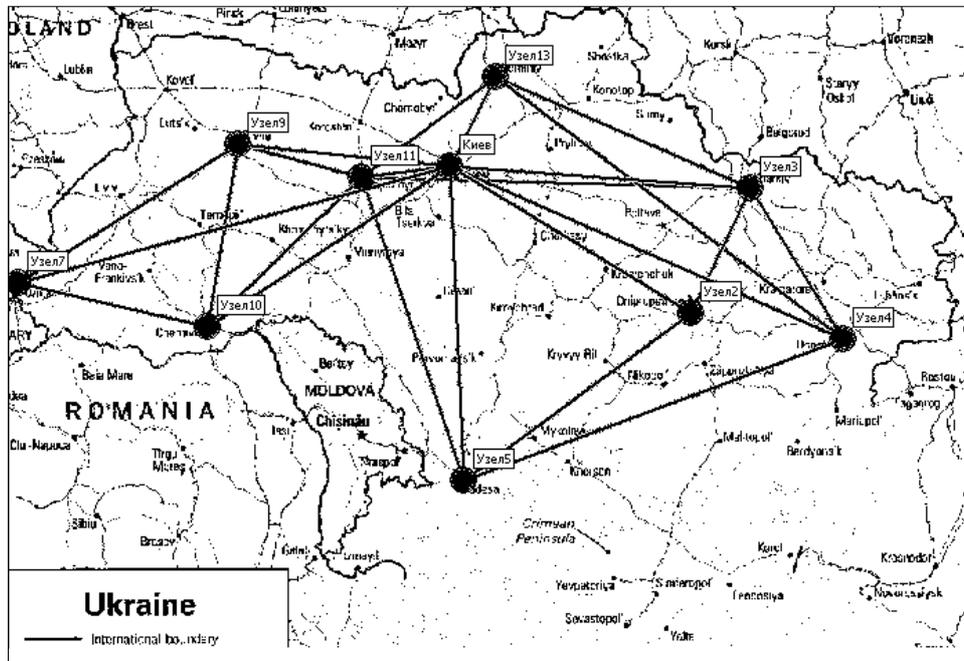


Рис. 8. Итоговая структура сети ATM

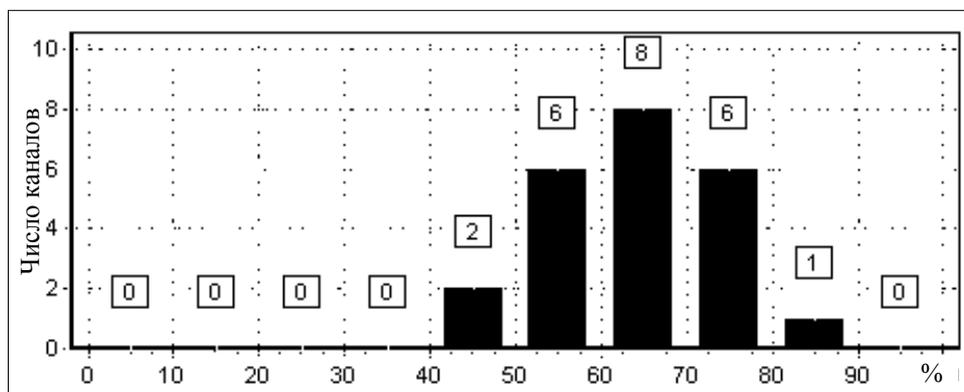


Рис. 9. Гистограмма распределения загрузок каналов связи: минимальная загрузка — 40%, канал «Київ-Узел 11»; максимальная загрузка — 82%, канал «Київ-Узел 10»; средняя загрузка каналов — 62%

Анализ полученных структур свидетельствует об устойчивости базовой структуры сети в широком диапазоне вариации входных потоков, что подтверждает корректную работу алгоритма синтеза структуры. С другой стороны, анализ рис. 9 и 11 показывает: при увеличении коэффициента k_{VBR} пик загрузки и средняя загрузка каналов увеличиваются, что вполне согласуется с теорией. Кроме того, следует подчеркнуть, что алгоритм ВПС РП дает равномерную загрузку всех каналов.

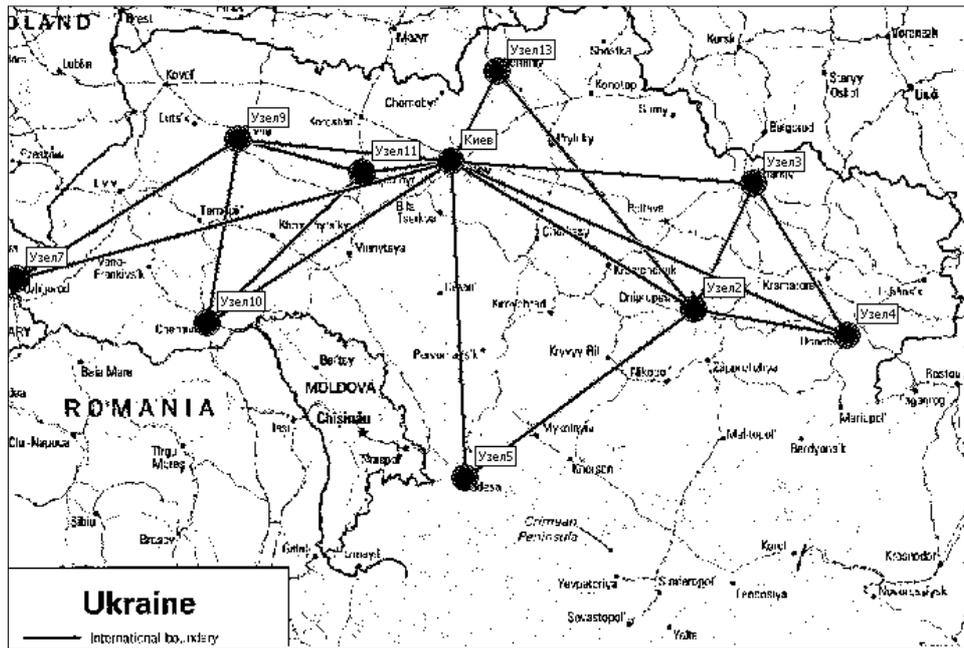


Рис. 10. Синтезированная сеть с расчетными данными для $k_{vbr}=5$

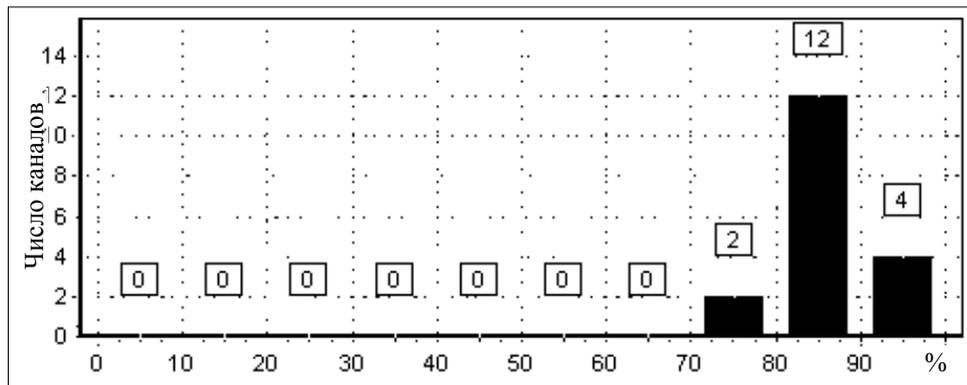


Рис. 11. Гистограмма распределения загрузок каналов связи: минимальная загрузка — 76%, канал «Узел 4 — Узел 3»; максимальная загрузка — 96%, канал «Киев — Узел 11»; средняя загрузка каналов — 85%

ВЫВОДЫ

1. В статье рассмотрен комплекс моделей, алгоритмов и программ анализа характеристик и синтеза структуры сетей с технологией ATM. Приведены аналитические модели для оценки основных показателей качества сетей ATM — средней задержки доставки ячеек CTD и вероятности их потери.

2. Сформулированы задачи анализа характеристик сетей ATM — выбор пропускных способностей (ВПС), распределение потоков (РП) и комбинированная задача (ВПС РП).

3. Сформулирована задача структурного синтеза сетей АТМ при ограничениях на заданные значения показателей качества и описан алгоритм ее решения.

4. Описана структура программного комплекса, реализующего предложенные алгоритмы, и приводятся результаты некоторых экспериментов.

5. Применение разработанного комплекса алгоритмов и программ позволяет оптимизировать функциональные характеристики сетей АТМ, синтезировать структуру проектируемых сетей, а также снизить затраты времени и средств на проектирование и создание сетей АТМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кульгин М.* Технология корпоративных сетей. — СПб.: Питер, 1999. — 710 с.
2. *Зайченко О.Ю.* Вибір маршрутів передачі та оптимальний розподіл потоків у мережах з технологією АТМ // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 4. — С. 16–24.
3. *Зайченко О.Ю.* Оптимальний вибір пропускних здатностей каналів зв'язку в мережах АТМ // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2000. — № 6. — С. 48–53.
4. *Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В.* Структурная оптимизация сетей ЭВМ. — Киев: Техніка, 1986. — 168 с.
5. *Зайченко Е.Ю.* Анализ и синтез структуры глобальных вычислительных сетей. — Киев: ЗАО «Укрспецмонтаж», 1998. — 108 с.
6. *Клейнрок Л.* Вычислительные системы с очередями. — М.: Мир, 1979. — 600 с.
7. *Зайченко О.Ю.* Аналіз показників живучості мереж з технологією АТМ // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 3. — С. 14–21.
8. *Зайченко О.Ю.* Оптимізація характеристик мереж з технологією АТМ // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 3. — С. 57–73.
9. *Зайченко О.Ю., Зайченко Ю.П.* Знаходження максимального потоку в мережах з режимом асинхронної передачі інформації // Відбір і обробка інформації. — Вип. 17(93). — 2002. — С. 59–64.
10. *Зайченко О.Ю.* Структурний синтез глобальних мереж з технологією АТМ за показниками обслуговування // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 5. — С. 5–11.
11. *Синтез структури корпоративної мережі з комутаторами / Ю.П. Зайченко, О.Ю. Зайченко, Д.М. Віштал, Р.Ф. Хотячук // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 6. — С. 5 — 14.*
12. *Інструментальний комплекс алгоритмів і програм структурного аналізу та синтезу мереж «АТМ NETBUILDER» / О.Ю. Зайченко, Ю.П. Зайченко, О.А. Аврутін, Д.Д. Архипенко, І.В. Панченко // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2002. — № 5. — С. 10–14.*

Поступила 04.06.2003