УДК 621.372

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ В СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

к.т.н. Л. А. Фомин, Н. Н. Гахова, С. Н. Зданевич, А. И. Ватага,
Ю.О. Малофей
(представил проф. А. В. Королёв)

Получен план статического распределения потоков на синтезируемой сети, который может быть положен в основу статических алгоритмов управления потоками информации. Описана процедура перехода от полносвязной сети к регулярной структуре с заданной связностью.

Для решения задачи построения межуровневой сети связи необходимо знать количество узлов коммутации, места их расположения и матрицу тяготений между ними. Полученная сеть должна обслуживать потоки, задаваемые матрицей тяготений и иметь минимальную стоимость, складывающуюся из стоимости каналов и узлов коммутации. На проектируемую сеть накладываются ограничения по времени передачи информации надежности, живучести, емкости узловых и канальных ресурсов, а также условия по использованию уже существующих фрагментов сети.

Данная постановка задачи позволяет получить план статического распределения потоков на синтезируемой сети, который может быть положен в основу статических алгоритмов управления потоками информации.

1. План оптимального распределения потоков в полносвязной сети. Представим модель сети в виде полносвязного графа $\mathbf{G}$, состоящего из $\mathbf{n}$ узлов. В этом случае поток в произвольной ветви $\mathbf{F_{ij}}$ равен сумме всех путевых потоков $\mathbf{X_p}$ ($\mathbf{p \in P}$, $\mathbf{P}$ - множество всех путей, протекающих через эту ветвь), т. е.

$$\mathbf{F_{ij}} = \sum_{\mathbf{p \in P}} \mathbf{X_p}, \quad \mathbf{i, j = \overline{1, n}}. \tag{1}$$

Пропускные способности $\mathbf{V_{ij}}$ соответствующих ветвей, обеспечивающих минимальную среднюю задержку в сети, могут быть определены из решения задачи оптимизации в любой из постановок, например [1],

$$\mathbf{V^*_{i,j} = F_{i,j} + d\sqrt{F_{i,j}}}, \quad \mathbf{i, j = \overline{1, n}}. \tag{2}$$

Поскольку потоки $\mathbf{F_{i,j}}$ удовлетворяют соотношению (2), то можно утверждать, что и путевые потоки, найденные из решения системы (1), будут обеспечивать минимальную среднюю задержку, т. е. в этом смысле будут оптимальными. Однако система уравнений (1) не является однозначной, поскольку число путевых потоков сети во много раз превышает число ветвей $\mathbf{F_{i,j}}$. Это означает, что в системе (1) число переменных превышает число уравнений. Так как (1) является системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), то выражения (1-2) можно рассматривать как задачу линейного программирования (ЛП), в которой (2) - целевая функция, а (1) - ограничения. Эта задача может быть решена, например, табличным симплекс - методом [2].

Для любой пары корреспондирующих абонентов **S** и **t** можно записать систему уравнений, включающих $\mathbf{m \le n - 2}$ транзитных узлов. Учитывая большое число путевых потоков, ограничим передачу информации только по маршрутам, содержащим не более двух транзитных узлов. Тогда общее число переменных (путевых потоков $\mathbf{X_p}$) составит [3]:

$$\mathbf{N_p = 1 + \sum_{z=1}^{2} A_n^z} \,. \tag{3}$$

Тогда система ограничений может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{F_{sk} = \sum_{l=1}^{n} X_{(k-1)m+l}}; \quad \mathbf{k}, l = \overline{\mathbf{1,m}}; \; l > \mathbf{k}; \\ \mathbf{F_{kt} = \sum_{j=1}^{n} X_{[(j-1)m+k]}}; \\ \mathbf{F_{k\mathit{l}} = X_{(k-1)m+l} - X_{(\mathit{l}-1)m+k}}; \\ \mathbf{F_{st} = X_o}. \end{cases} \tag{4}$$

В соответствии с законом сохранения потока для каждого узла

$$\mathbf{\sum_{\delta=1}^{p+1} F_{ik} = F_o} \left| \begin{array}{l} \mathbf{1, i = S;} \\ \mathbf{0, i \ne S, t;} \\ \mathbf{-1, i = t,} \end{array} \right. \tag{5}$$

где **p** – связность графа; $\mathbf{i = \overline{1,n}}$.

Так как **n** уравнений системы (4) являются линейной комбинацией остальных уравнений, то можно выбросить любые **n** уравнений из рассмотрения, как линейно - зависимые. Выразим базисные переменные через свободные (приведение к каноническому виду):

$$\begin{cases} \mathbf{X_{[(k-1)m+\mathit{l}]} = F_{sk} - \sum_{j=k+1}^{m} F_{kj} - \left(\sum_{j=1}^{k-1} X_{[(k-1)m-j]} - \sum_{j=k+1}^{\mathit{l}} X_{[(j-1)m+k]} \right)}, \; l > \mathbf{k}; \\ \\ \mathbf{X_{[(k-1)m+\mathit{l}]} = F_{k\mathit{l}} + X_{[(\mathit{l}-1)m+k]}}, \\ \mathbf{X_o = F_{st}}. \end{cases} \tag{6}$$

В правой части системы уравнений (6) стоят базисные переменные, число которых равно числу уравнений:

$$\mathbf{N_o = \frac{(m+2)(m+1)}{2} - m = \frac{m^2+m+2}{2}}. \qquad (7)$$

Общее число переменных (путевых потоков) определяется выражением (3), так что число свободных переменных равно

$$\mathbf{N_c = N_p - N_б = 1 + \sum_{z=1}^{z} A_n^z - \frac{m^2+2}{2}}. \qquad (8)$$

Результат решения задачи линейного программирования (ЛП) зависит от выбора целевой функции, вид которой определяется конкретными условиями общей задачи синтеза сети связи. Не вдаваясь в тонкости анализа данного вопроса зададимся (в качестве примера) условием: максимум информации от узла **S** к узлу **t** передается по маршрутам, которые содержат не более одного транзитного узла, т. е.

$$\begin{gathered}\mathbf{L(x) = X_o + \sum_{k=1}^{m} X_{[(k-1)m+k]} = X_o + \sum_{k=1}^{m} F_{sk} - \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} F_{kl}} - \\ \mathbf{- \sum_{k=1}^{m}\left(\sum_{l=1}^{k-1} X_{[(k-1)m+l]} + \sum_{l=k+1}^{m} X_{[(l-1)m+k]}\right)}.\end{gathered} \qquad (9)$$

По закону сохранения потока

$$\mathbf{X_o + \sum_{k=1}^{m} F_{sk} = F_o}. \qquad (10)$$

Целевая функция (9) с учетом (10), примет вид

$$\mathbf{L(X) = F_0 - \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} F_{kl} - 2\sum_{kl} X_{св}}, \qquad (11)$$

где

$$\mathbf{2\sum_{nk} X_{св} = \sum_{k=1}^{m}\left(\sum_{l=1}^{k-1} X_{[(k-1)m+l]} + \sum_{l=k+1}^{m} X_{[(l-1)m+k]}\right)}. \qquad (12)$$

Окончательно целевая функция для решения задачи табличным симплекс - методом преобразуется к виду

$$\mathbf{L'(x) = L(x) = \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} F_{kl} - F_0 - 2\sum_{kl}(-X_{св}) \to min}. \qquad (13)$$

Если выполняются условия:

$$\left\| \begin{aligned} & \mathbf{F_{sk} - \sum_{l=k+1}^{n} F_{kl} > 0;} \\ & \mathbf{F_{kl} > 0,} \end{aligned} \right. \qquad (14)$$

то задача ЛП имеет допустимое решение.

Кроме того, если путевые потоки, образующие свободные переменные $\mathbf{X_{св}}$ ориентированы в направлении от **s** к **t,** то задача ЛП содержит и оптимальное решение, которое без дополнительных симплекс - преобразований находится путем обращения в ноль свободных переменных ($\mathbf{X_{св} = 0}$):

$$\left\| \begin{aligned} & \mathbf{X}^{*}_{[(k-l)m-k]} = \mathbf{F_{sk}} - \sum_{l=k+1}^{m} \mathbf{F_{kl}}; \\ & \mathbf{X}^{*}_{[(k-1)m-l]} = \mathbf{F_{kl}}; \end{aligned} \right. \qquad (15)$$

$$\mathbf{L^{max}_{(x)}} = \mathbf{F_0} - \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=1}^{m} \mathbf{F_{kl}}.$$

В качестве примера рассмотрим шестиузловую полносвязную сеть с выделенными узлами **S** и **t** и четырьмя транзитными узлами **(m = n - 2 = 4)**. Для данной модели запишем уравнения (1) в соответствии с формулами (4):

$$\begin{aligned} & \mathbf{F_{1t} = X_1 + X_5 + X_9 + X_{13}}; \\ & \mathbf{F_{2t} = X_2 + X_6 + X_{10} + X_{14}}; \\ & \mathbf{F_{3t} = X_3 + X_7 + X_{11} + X_{15}}; \\ & \mathbf{F_{4t} = X_4 + X_8 + X_{12} + X_{16}}. \end{aligned} \qquad (16)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{F_{s1} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4}; \\ & \mathbf{F_{s2} = \underline{X_5} + X_6 + X_7 + X_8}; \\ & \mathbf{F_{s3} = \underline{X_9} + \underline{X_{10}} + X_{11} + X_{12}}; \\ & \mathbf{F_{s4} = \underline{X_{13}} + \underline{X_{14}} + \underline{X_{15}} + X_{16}}. \end{aligned} \qquad (17)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{F_{12} = X_2 - \underline{X_5}}; \\ & \mathbf{F_{13} = X_3 - \underline{X_9}}; \\ & \mathbf{F_{14} = X_4 - \underline{X_{13}}}; \\ & \mathbf{F_{23} = X_7 - \underline{X_{10}}}; \\ & \mathbf{F_{24} = X_8 - \underline{X_{14}}}; \\ & \mathbf{F_{34} = X_{12} - \underline{X_{15}}}; \\ & \mathbf{F_{st} = X_0}. \end{aligned} \qquad (18)$$

Запишем законы сохранения потока для каждого узла в соответствии с формулой (5):

$$
\begin{aligned}
&\text{узел} \quad \mathbf{S \to F_{st} + F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} = F_0};\\
&\text{узел} \quad \mathbf{1 \to F_{s1} - F_{1t} - F_{12} - F_{13} - F_{14} = 0};\\
&\text{узел} \quad \mathbf{2 \to F_{s2} + F_{12} - F_{2t} - F_{23} - F_{24} = 0};\\
&\text{узел} \quad \mathbf{3 \to F_{s3} + F_{13} + F_{23} - F_{st} - F_{34} = 0};\\
&\text{узел} \quad \mathbf{4 \to F_{4t} - F_{s4} - F_{14} - F_{24} - F_{34} = 0};\\
&\text{узел} \quad \mathbf{t \to F_{st} + F_{1t} + F_{2t} + F_{3t} + F_{4t} = -F_0}.
\end{aligned}
\qquad (19)
$$

Исключаем, например, систему (16), как линейную комбинацию уравнений (17,18) с учетом (19). В качестве свободных переменных выберем переменные, расположенные левее и ниже главной диагонали в системе (17), которые подчеркнуты ($\mathbf{X_5}$, $\mathbf{X_9}$, $\mathbf{X_{10}}$, $\mathbf{X_{13}}$, $\mathbf{X_{14}}$, $\mathbf{X_{15}}$**).**

Проверяем условия (3), (7) и (8).

1.Общее число путевых потоков

$$\mathbf{N_p = 1 + \sum_{z=1}^{2} A_4^z = 17}.$$

2. Число базисных переменных

$$\mathbf{N_б = \frac{4^2 + 4 + 2}{z} = 11}.$$

3. Число свободных переменных

$$\mathbf{N_c = N_p - N_б = 17 - 11 = 6}.$$

Это не противоречит сделанному выбору. Выразим базисные переменные через свободные:

$$
\begin{aligned}
&\mathbf{X_0 = F_{st}};\\
&\mathbf{X_1 = F_{1t} - (X_5 + X_9 + X_{13})};\\
&\mathbf{X_2 = F_{12} + X_5};\\
&\mathbf{X_3 = F_{13} + X_9};\\
&\mathbf{X_4 = F_{14} + X_{10}};\\
&\mathbf{X_6 = F_{2t} - F_{12} - (X_5 + X_{10} + X_{14})};\\
&\mathbf{X_7 = F_{23} + X_{10}};\\
&\mathbf{X_8 = F_{24} + X_{14}};\\
&\mathbf{X_{11} = F_{s3} - F_{34} - (X_9 + X_{10} + X_{15})};\\
&\mathbf{X_{12} = F_{34} + X_{15}};\\
&\mathbf{X_{16} = F_{s4} - (X_{13} + X_{14} + X_{15})}.
\end{aligned}
\qquad (20)
$$

Если обеспечить выполнение условий

$$\mathbf{F_{2t} - F_{12} > 0} \quad \text{и} \quad \mathbf{F_{s3} - F_{34} > 0}, \qquad (21)$$

то при $\mathbf{X_{св} = 0}$ решение будет допустимым при значениях потоков

$$\mathbf{F_{i,j} > 0}, \tag{21′}$$

т. е. если все потоки в ветвях направлены от **S** к **t**.

Потребуем, чтобы максимальное количество информации передавалось потоками, содержащими в пути не более одного транзитного узла, т. е.

$$\begin{aligned} \mathbf{L(X)} &= \mathbf{X_0 + X_1 + X_6 + X_{11} + X_{16}} = \\ &= \mathbf{F_0 - F_\Sigma - 2(X_5 + X_9 + X_{10} + X_{13} + X_{14} + X_{15})} = \\ &= \mathbf{F_0 - F_\Sigma - 2\sum X_{св} \to max}, \end{aligned} \tag{22}$$

где $\mathbf{F_\Sigma = F_{12} + F_{15} + F_{14} + F_{23} + F_{24} + F_{34}}$.

При использовании табличного симплекс - метода, который позволяет находить минимум целевой функции, преобразуем выражение (22) к виду

$$\mathbf{L'(X) = -L(X) = (F_\Sigma - F_0) - 2\sum(-X_{св}) \to min}. \tag{23}$$

Уравнения (20 и 22) содержат допустимое и оптимальное решение, если выполняются условия (21 и 21′), поскольку все коэффициенты при $\mathbf{X_{св}}$ отрицательны и равны –1.

Полагая $\mathbf{X_5 = X_9 = X_{10} = X_{13} = X_{14} = X_{15} = 0}$, получим окончательное решение сформулированной задачи ЛП:

$$\mathbf{L(X) = F_0 - F_\Sigma};$$

$$\mathbf{\overline{X}} = \begin{pmatrix} \mathbf{X_0 = F_{st}; X_1 = F_{1t}; X_2 = F_{12}; X_3 = F_{13}; X_4 = F_{14}; X_5 = 0; X_6 = F_{2t} - F_{12};} \\ \mathbf{X_7 = F_{23}; X_8 = F_{24}; X_9 = 0; X_{10} = 0; X_{11} = F_{s2} - F_{34};} \\ \mathbf{X_{12} = F_{34}; X_{13} = 0; X_{14} = 0; X_{15} = 0; X_{16} = F_{s4}.} \end{pmatrix} \tag{24}$$

Зададим в качестве исходных данных потоки в ветвях в виде взвешенной матрицы требований (смежности) таким образом, чтобы соблюдались законы сохранения потока для каждого узла (в усл. ед., табл. 1).

Таблица 1

Матрица смежности исходных потоков

n \ n	**S**	1	2	3	4	**t**
S	-	50	26	18	15	16
1		-	12	14	9	15
2			-	11	10	17
3				-	6	37
4					-	40
t						-

Закон сохранения потока для узлов **S** и **t** будет соблюдаться при $\mathbf{F_0 = 125}$. Ниже приведены расчетные значения путевых потоков, соответствующих табл. 1:

$$\mathbf{X_0 = 16;\ X_1 = 12;\ X_3 = 14;\ X_4 = 9;\ X_6 = 5;}$$
$$\mathbf{X_7 = 11;\ X_8 = 10;\ X_{11} = 12;\ X_{12} = 6;\ X_{16} = 15.}$$

Граф - модель сети связи с означенными потоками $\mathbf{F_{i,j}}$ представлен на рис. 1. В скобках на каждой ветви графа показаны значения оптимальных пропускных способностей, при которых обеспечивается минимальное среднее время задержки при стоимости сети 300 усл. ед., которые рассчитаны по формуле (2), где

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{C_{зад}} - l \sum\limits_{\mathbf{i,j=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{F_{i,j}}}{\mathbf{k} \sum \sqrt{\mathbf{F_{i,j}}}}, \quad \mathbf{k = 1}.$$

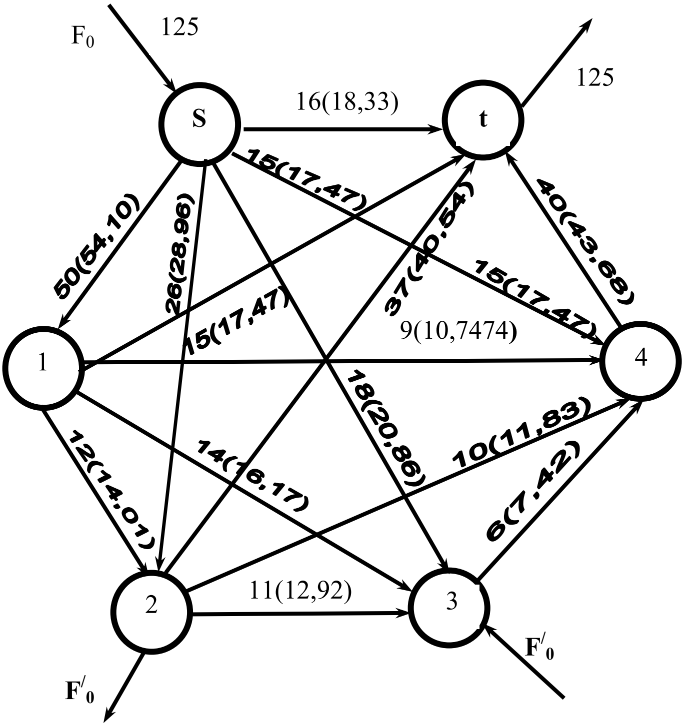

Рис. 1. Граф - модель сети связи

Более половины всей информации будет передаваться по шести кратчайшим маршрутам

$$\mathbf{L^{min}(X) = 125 - 62 = 63} \text{ у.е.}$$

На рис. 2 представлены рассчитанные маршруты передачи информации.

Очевидно, что для получения полной картины распределения потоков в сети, необходимо аналогичную задачу решить для каждой пары выделенных узлов (например, $\mathbf{S}$ и $\mathbf{t'}$ на рис.1) со своими начальными потоками $\mathbf{F}_0'$. Полученные значения $\mathbf{F}_{ij}^{kl}$ для каждого варианта решения задачи должны быть просуммированы по всем вариантам $\left(\mathbf{k}, l = \overline{\mathbf{1}, \mathbf{n}}\right)$ решения и могут рассматриваться как результирующие нагрузки на соответствующую линию связи

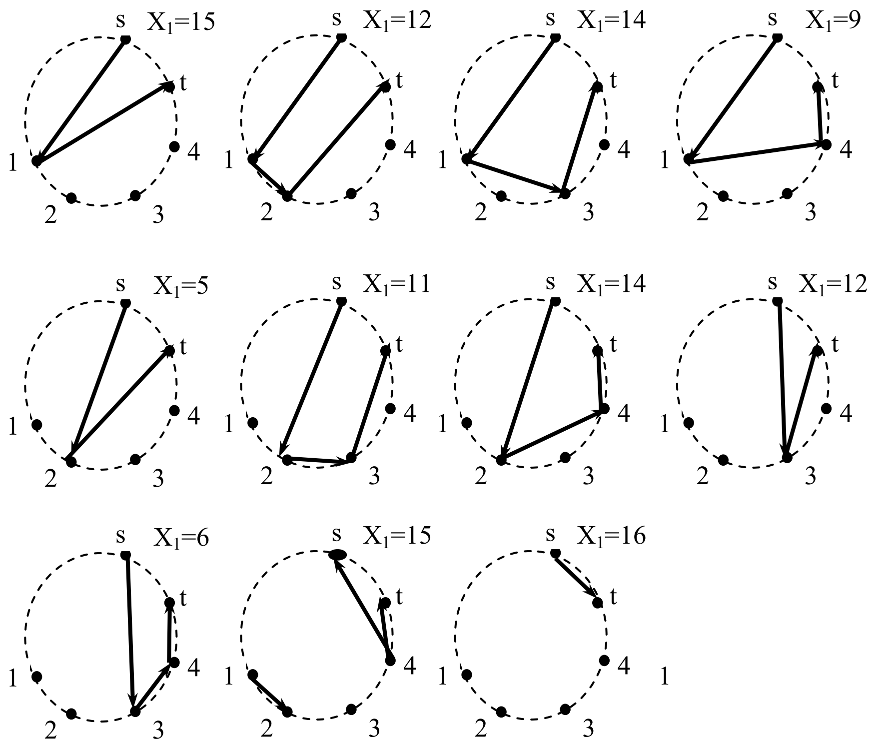

Рис. 2. Маршруты передачи информации

Если при этом начальные потоки $\mathbf{F}_o^{\mathbf{k}}$ генерируются каждым узлом **k**, а не поступают извне, то их значения должны соответствовать матрице тяготения $\left\|\lambda_{\mathbf{ij}}\right\|$, элементы которой, как правило, задаются в качестве исходных данных.

В том случае, если рассмотренная структура является фрагментом некоторой глобальной сети, то начальные потоки могут быть использованы для объединения отдельных фрагментов через специальные шлюзы в более широкую структуру с соблюдением закона сохранения для каждой пары смежных узлов, принадлежащих различным фрагментам.

2. Переход от полносвязной сети к регулярной структуре с заданной связностью. Полученные в предыдущем разделе соотношения (4) описывают статическое распределение потоков в полносвязной сети. Однако данную структуру вряд ли целесообразно реализовывать на практике при синтезе сетей передачи данных из-за ее чрезвычайно высокой стоимости, особенно в тех случаях, когда этого не требуется по условиям надежности. То обстоятельство, что при подобной структуре каждый абонент может связываться с любым другим по самостоятельному каналу, облегчает решение задачи маршрутизации сообщений, но зачастую оказывается недостаточным в условиях деградации сети. Уравнения (4) предусматривают кроме того альтернативные маршруты передачи по путям, содержащим один или два транзитных узла. Благодаря этому, уравнения (4) могут легко трансформироваться применительно к безызбыточным структурам, например, методом исключения ветвей [1], до получения структур с заданной связностью.

Наиболее просто данную процедуру осуществить методом упорядоченного исключения ветвей для получения регулярной структуры с заданными свойствами и удовлетворяющей требованию по надежности (связности).

Так, например, если исключить связи между всеми узлами, которые образуют внешний гамильтонов цикл, то связность графа уменьшается на две единицы [1].

Уравнения (4) при этом значительно упростятся за счет того, что часть переменных обратится в ноль:

$$\mathbf{F_{s1}} = \sum_{j=1}^{n} \mathbf{X_j} = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{F_{nt}} = \sum_{j=1}^{n} \mathbf{X_{nj}} = \mathbf{0}; \tag{25}$$

$$\mathbf{F_{i(i+1)}} = \mathbf{X}\big[(\mathbf{i}-\mathbf{1})(\mathbf{n}+\mathbf{1})+\mathbf{2}\big] - \mathbf{X_i}(\mathbf{n}+\mathbf{1}) = \mathbf{0}.$$

Поскольку $\mathbf{F_{si}}, \mathbf{F_{nt}}, \mathbf{F_{i(i+1)}}$ обращаются в ноль, то обращаются и все путевые потоки $\mathbf{X_j}, \mathbf{X_{nj}}, \mathbf{X}_{[(i-1)(n-1)+2]}$ и $\mathbf{X_{i(n+1)}}$, которые в сумме и образуют соответствующий поток в ветви. Естественно в этом случае необходимо потребовать выполнения закона сохранения потока. Поскольку происходит резкое сокращения количества путевых потоков (переменных), оставшаяся система уравнений оказывается однозначной, т.е. имеет единственное решение.

Рассмотрим это решение на примере шестиузловой сети.

На рис. 3 приведен преобразованный регулярный граф. В соответствии с уравнениями (25):

$$\mathbf{F_{st}} = \mathbf{F_{s1}} = \mathbf{F_{4t}} = \mathbf{F_{12}} = \mathbf{F_{23}} = \mathbf{F_{34}} = \mathbf{0}, \tag{26}$$

а, следовательно, путевые потоки

$$\mathbf{X_0 = X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = X_5 = X_7 = X_8 = X_{10} = X_{12} = X_{15} = X_{16} = 0}.$$

Оставшиеся путевые потоки, которые могут быть использованы для передачи информации между **S** и **t** и осуществления альтернативной маршрутизации

$$\mathbf{X_6 \neq 0;\ X_9 \neq 0;\ X_{11} \neq 0;\ X_{13} \neq 0;\ X_{14} \neq 0}.$$

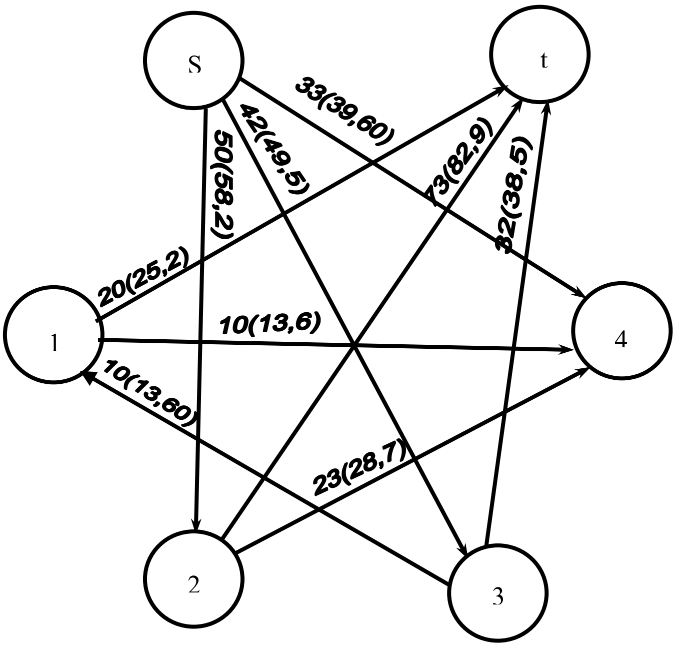

Рис. 3. Преобразованный регулярный граф

Потребуем выполнения закона сохранения потока для каждого узла:

$$\begin{aligned}
&\text{узел S}: \mathbf{F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} = F_o};\\
&\text{1 узел}: \mathbf{F_{1t} - F_{13} - F_{14} = 0};\\
&\text{2 узел}: \mathbf{F_{s2} + F_{42} - F_{2t} = 0};\\
&\text{3 узел}: \mathbf{F_{s3} - F_{13} - F_{3t} = 0};\\
&\text{4 узел}: \mathbf{F_{s4} - F_{14} - F_{42} = 0};\\
&\text{узел t}: \mathbf{F_{1t} + F_{2t} + F_{3t} = F_0}.
\end{aligned} \qquad (27)$$

Зададим начальный поток на прежнем уровне $\mathbf{F_0 = 125}$ у.е. Перераспределим этот поток по оставшимся ветвям, исходящим из узла **S**, в соответствии с табл. 1 следующим образом:

$$\mathbf{F_{s2} = 50;\ F_{s3} = 26 + 16 = 42;\ F_{s4} = 18 + 15 = 33},$$

так, чтобы было выполнено условие

$$\mathbf{F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} = 125}.$$

Оставшиеся 5 уравнений позволяют однозначно определить потоки в ветвях, рассчитанные значения которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Приведенная матрица нагрузок

S	**S**	1	2	3	4	**t**
S	-	0	50	42	33	0
1		-	0	10	10	20
2			-	0	23	73
3				-	0	32
4					-	0
t						-

Ниже даны рассчитанные в соответствии с (25) значения путевых потоков:

$\mathbf{X_6 = 50}$ у.е.; $\mathbf{X_9 = 10}$ у.е.; $\mathbf{X_{11} = 32}$ у.е.; $\mathbf{X_{13} = 10}$ у.е.; $\mathbf{X_{14} = 23}$ у.е., которые переносят 125 у.е. информации из узла **S** в узел **t**.

На рис. 4 приведены сами маршруты передачи.

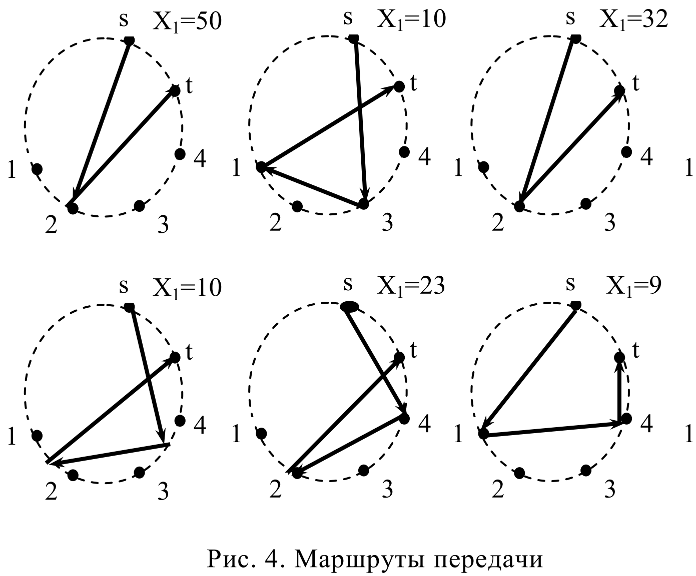

Рис. 4. Маршруты передачи

На графе, приведенном на рис. 3, обозначены значения потоков в каждой ветви и оптимальные значения пропускных способностей (цифры в скобках), рассчитанные по формулам (2) и (24) при стоимости сети **C = 350** у.е. и обеспечивающие такое же время задержки, как и в полносвязной сети.

Тот факт, что минимальное среднее время задержки в данном случае достигается при большей стоимости сети, отражает субъективный характер различных форм функций стоимости. Наиболее употребительная форма этой функции [4] в виде линейной комбинации пропускных способностей не учитывает длину линий связи и стоимость их прокладки, так как эти параметры не находят органической связи с общей задачей оптимизации, когда в качестве функционалов выступают соотношения, заимствованные из теории массового обслуживания [5].

На практике возникает самостоятельная задача управления потоками, связанная с разработкой адаптивных алгоритмов управления, которые реагируют как на изменения потоков за пределами номинальных значений, так и на динамические изменения состояния и производительности элементов сети. При этом возникают определенные трудности, причина которых состоит в том, что в динамических алгоритмах процессы, описывающие поведение системы, зависят от принимаемых решений, а эти решения должны учитывать текущее состояние сети. Это означает, что каждым начальным условиям будет соответствовать собственное оптимальное распределение потоков, а для оптимальной маршрутизации необходимо каждый раз разрешать задачу оптимизации при новых начальных условиях, что не только требует знания состояния сети на каждый текущий момент, но и не может быть выполнено в реальном масштабе времени.

Эта самостоятельная задача, не связанная с топологическим проектированием, должна решаться путем применения развитой системы управления, поддерживающей гармоничную внутреннюю организацию сети. При этом цель статического управления – сохранение трафика в пределах, совместимых с наличными ресурсами при скоростях передачи, близких к номинальной величине. Важным фактором является простота управления потоками, которая находится в прямой зависимости от строгой упорядоченности структуры, так как в этом случае удается связать аналитическими зависимостями потоки в ветвях и путевые потоки.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Путевой поток $\mathbf{X_p}$ определяется минимальной пропускной способностью ветви в соответствующем маршруте, причем всегда существует ветвь, в которой протекает один путевой поток, величина которого определяется пропускной способностью данной ветви.

2. Пропускная способность ветви превосходит поток в данной ветви на величину, пропорциональную корню квадратному из этого потока. Это не только необходимо для предотвращения перегрузок, но и обеспечивает минимальное время доставки информации. В этом смысле и путевые потоки можно считать оптимальными, а, следовательно, получен-

ное статическое распределение потоков можно рассматривать как вариант оптимальной маршрутизации.

3. При известном статическом распределении потоков правильно рассчитанная сеть должна сама предотвращать перегрузки без участия специально организованной системы управления, координирующей потоки по всей распределенной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дэвис Д., Барбер Д. Вычислительные сети и сетевые протоколы. – М.: Наука, 1975. – 508 с.*
2. *Реклейтис Г. Оптимизация в технике. – М.: Наука, 1989. – 398 с.*
3. *Мизин И. А. Сети коммутации пакетов.–- М.: Радио и связь, 1986.– 408 с.*
4. *Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.*
5. *Новиков О. А., Петухов С. И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания.– М.: Сов. радио, 1969. – 400 с.*

Поступила 22.12.2001

***ФОМИН Лев Андреевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры АСС Филиала РВИ РВ (г. Ставрополь). Окончил в 1965 году Пермское высшее военное инженерное училище. Область научных интересов – сети передачи данных.*

***ГАХОВА Нина Николаевна**, преподаватель кафедры автоматизированных систем управления Северо-Кавказского государственного технического университета. Окончила в 1984 году Харьковский институт радиоэлектроники. Область научных интересов – автоматизированные системы управления.*

***ЗДАНЕВИЧ Сергей Николаевич**, преподаватель кафедры АСС Филиала РВИ РВ (г. Ставрополь). Окончил в 1990 году Ставропольское высшее военное инженерное училище связи. Область научных интересов – сети передачи данных.*

***ВАТАГА Александр Иванович**, преподаватель кафедры АСС Филиала РВИ РВ (г. Ставрополь). Окончил в 1978 году Ставропольское высшее военное инженерное училище связи. Область научных интересов – сети передачи данных.*

***МАЛОФЕЙ Юлия Олеговна** – младший научный сотрудник НИЛ Ростовского военного института РВ (г. Ставрополь). Окончила в 1999 г. Северо-Кавказский государственный технический университет. Область научных интересов – автоматизированные системы управления.*