

**М.И. Столярова****СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ РЕКОНСТРУКЦИИ  
СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ  
СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Столярова Мария Ивановна, окончила факультет многоканальных телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Ведущий инженер ОАО «НИИ «Рубин». Имеет статьи в области построения, анализа и управления телекоммуникационными сетями специального назначения. [e-mail: inforubin@rubin-spb.ru].*

**Аннотация**

Статья посвящена вопросам математического моделирования и разработки методики формирования рациональной структуры транспортной сети для использования в интересах должностных лиц по связи в телекоммуникационной системе специального назначения.

Ключевые слова: транспортная сеть, синтез, реконструкция, топологическая структура, потоковая структура.

Характер и особенности эксплуатации телекоммуникационной системы связи специального назначения (ТКС СН) во многом определяются рациональностью построения ее топологической, потоковой и физической структур. Особенно актуален данный вопрос для современных мультисервисных сетей, где совокупный сетевой ресурс формируется в интересах выполнения требований потребителей по предоставлению различных услуг, качество которых зависит от характеристик транспортной сети (ТС) и, в первую очередь, от ее структуры.

Для решения задачи формирования рациональной структуры ТС, возникающей на этапах проектирования (планирования) и оперативного управления связью в ТКС СН, предлагается использовать подход, базирующийся на декомпозиции структуры на ряд последовательных подзадач с объединением их единими исходными данными и критерием в соответствующей математической модели.

Математическую модель структуры ТС [1] предлагается декомпонировать на следующий ряд последовательных взаимоувязанных модулей: синтеза, реконструкции структуры, оценки воздействия внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ), распределения узлового и линейного ресурсов, оценки временных и материальных ресурсов.

В основе математической модели структуры ТС лежит описание с применением теории графов ее структурно-функционального построения  $G(A, B)$ , отображающего элементы узловой ( $A$ ) и линейной ( $B$ ) основы ТС, а именно: магистральные ( $A_1$ ), региональные ( $A_2$ ), узлы доступа ( $A_3$ ), узлы операторов сети

связи общего пользования ( $A_4$ ), узлы связи пользователей ( $A_5$ ) и линии передачи между ними.

Модуль синтеза структуры ТС (1)–(20) описывает состав и местоположение узлов и линий передачи (вершины и ребра графа сети) (2)–(3), пропускных способностей систем передачи ребер графа (4), реализуемых узловым и линейным ресурсами (5) и (6), а также ограничения и допущения по их реализации (10)–(18).

$$G(A, B) \Rightarrow G(A, B, U, Y); \quad (1)$$

$$A = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5; \quad (2)$$

$$B = \{b_{ij}\}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j; \quad (3)$$

$$U = \{u_{ij}\}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j; \quad (4)$$

$$R_y(A) = \{r^\nu, \nu = \overline{1, Q_y}\}; \quad (5)$$

$$R_l(B) = \{r^\mu, \mu = \overline{1, Q_l}\}; \quad (6)$$

$$W = W(r^\nu) + W(r^\mu) \Rightarrow \min; \quad (7)$$

$$W(r^\nu) = \sum_i \sum_\nu \gamma_i^\nu u_i^\nu, i = \overline{1, N}, \nu = \overline{1, Q_y}; \quad (8)$$

$$W(r^\mu) = \sum_{(ij)} \sum_\mu \gamma_{ij}^\mu l_{ij}^\mu, i, j = \overline{1, N}, i \neq j, \mu = \overline{1, Q_l}; \quad (9)$$

$$\overline{Y}^{\text{TP}} \Rightarrow \max; \quad (10)$$

$$k_{\text{свЗк}} \geq k_{\text{свЗк}}^{\text{TP}}; \quad (11)$$

$$K_{\text{св,опт}} = \max_S \min_F K_{\text{св}}(S_j, f_c); \quad (12)$$

$$Y(R_l) = \{y_{ij}(r_\mu), i, j = \overline{1, N}; \mu = \overline{1, Q_l}\}; \quad (13)$$

$$\rho(a_i) < \rho^{\text{доп}}(a_i), i = \overline{1, N}; \quad (14)$$

$$u_{ij} \geq \{v_{z_k}^{\text{треб}}\}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j; \quad (15)$$

$$E = \{\varepsilon_\tau, \tau = \overline{1, H}\}; \quad (16)$$

$$v_{z_k} = \max \{v_{z_k}(\varepsilon_\tau), \tau = \overline{1, H}\}; k = \overline{1, m}; \quad (17)$$

$$k_{\text{свЗк}}^{\text{TP}} = \max \{k_{\text{свЗк}}^{\text{TP}}(\varepsilon_\tau), \tau = \overline{1, H}\}; k = \overline{1, K}; \quad (18)$$

$$\sum_{b_{ij} \in B} \alpha_k l_{ij} \Rightarrow \min; \quad (19)$$

$$\sum_{b_{ij} \in B} \alpha_k u_{ij} l_{ij}^p + \sum_{b_{ij} \in B} \alpha_k u_{ij}^p l_{ij}^p \Rightarrow \min, \quad (20)$$

где  $U$  – пропускная способность множества систем передачи на всех линиях передачи (ребрах) сети;

$Y$  – структурная устойчивость ТС;  
 $i$  и  $j$  – номера вершин графа  $G(A, B)$ , отображающего структуру ТС;  
 $N$  – количество вершин в графе;  
 $b_{ij}$  – ребра графа;  
 $u_{ij}$  – пропускная способность линий (систем) передачи;  
 $r^v$  – ресурс (средство)  $v$ -го типа на узле связи;  
 $Q_y$  – количество типов узловых ресурсов (средств) на узлах в ТС;  
 $r^\mu$  – ресурс  $\mu$ -го типа линий передачи;  
 $Q_l$  – количество типов линейных ресурсов (средств) в ТС;  
 $\gamma_i^v$  – стоимость порта коммутатора;  
 $u_i^v$  – производительность коммутатора;  
 $\gamma_{ij}^\mu$  – отношение стоимости пропускной способности к единице длины линии передачи;  
 $l_{ij}$  – длина линий передачи;  
 $u_{ij}^\mu$  – пропускная способность  $r^\mu$  средства;  
 $S = \{S_j\}$  – множество стратегий построения ТС ТКС СН;  
 $F = \{f_c\}$  – множество стратегий по построению систем, обеспечивающих воздействие ВДФ;  
 $y_{ij}(r^\mu) = 1$  – если между узлами  $a_i$  и  $a_j$  возможно использование  $r^\mu$  средства, в противном случае  $-y_{ij}(r^\mu) = 0$ ;  
 $\epsilon_\tau$  –  $\tau$ -я степень боевой готовности из множества  $H$ ;  
 $\alpha_k$  – коэффициенты приведенной стоимости единицы линии передачи при ее строительстве или аренде;  
 $u_{ij}^p$  – пропускная способность резервных линий передачи;  
 $l_{ij}^p$  – длина резервных линий передачи.

В качестве критерия эффективности решения задачи принимается минимизация затрат на реализацию структуры ТС при безусловном выполнении сетью задач по образованию необходимого транспортного ресурса (7)–(9), то есть:

– при синтезе топологической структуры путем минимизации общей длины линейной основы (19);

– при синтезе потоковой структуры путем минимизации расхода средств на обеспечение требуемой пропускной способности рациональной топологической структуры (20).

Модуль реконструкции структуры ТС (21)–(25) с применением положений теории графов описывает анализируемый вариант реконструкции структуры ТС (21), требования по пропускной способности, предъявляемые к ней (22), стоимость реализации (23) и ограничения на пропускную способность систем передачи (24) и (25).

$$\sum_{l_{ij} \in D_1(i)} h_{ij} f_{ij} + \sum_{l_{ij} \in D_2(i)} f_{ij} - \sum_{l_{ji} \in R_1(i)} h_{ji} f_{ji} - \sum_{l_{ji} \in R_2(i)} f_{ji} = \begin{cases} v, & i = 1; \\ 0, & i = \overline{2, n-1}; \\ -v, & i = n \end{cases} \quad (21)$$

$$v \geq v_3; \quad (22)$$

$$\sum_{l_{ij} \in I(\psi)} h_{ij} \alpha_k l_{ij} \leq c_3; \quad (23)$$

$$0 \leq f_{ij} \leq u_{ij}, \quad l_{ij} \in V; \quad (24)$$

$$h_{ji} = \{0, 1\}, \quad l_{ij} \in E, \quad (25)$$

где  $R_1(i)$  и  $D_1(i)$  – множество дуг графа  $G$ , входящих и выходящих из вершины  $a_i$  соответственно;

$R_2(i), D_2(i)$  – множество входящих и выходящих из вершины  $a_i$  дуг графа, отображающего существующую структуру ТС;

$v = \max\{f_{ij}\}$  – максимальный поток из  $\{f_{ij}\}$ ;

$v_3$  – требуемое значение величины потока;

$c_3$  – заданная стоимость реконструкции сети;

$V$  – множество ветвей графа, отображающего существующую структуру и варианты реконструкции ТС;

$E$  – множество ветвей графа, отображающего структуру вариантов реконструкции ТС.

Модуль оценки ВДФ на структуру ТС в процессном представлении описывает способ определения и критерии выбора рационального варианта структуры транспортной сети, функционирующей в условиях возмездий (26).

$$P(I_p(\psi)) = \max_{\psi} \left\{ \min_{\xi} P_{\psi\xi} (t_{\psi\xi} \leq t_d) \right\}, \quad \psi = \overline{1, V}, \quad \xi = \overline{1, M}, \quad (26)$$

где  $\psi$  – очередной оцениваемый вариант структуры ТС,

$V$  – количество оцениваемых вариантов;

$\xi$  – очередное оцениваемое направление связи в варианте структуры ТС;

$M$  – общее количество направлений связи в варианте;

$P_{\psi\xi} (t_{\psi\xi} \leq t_d)$  – требуемая вероятность своевременной доставки пакетов в ТС.

Модуль распределения узлового и линейного ресурсов в ТС в процессном представлении описывает рациональное решение задачи их распределения при реализации принятого варианта структуры в соответствии с критерием «золотой» пропорции (27).

$$x_k^t = \overline{\Phi}^{i-1} \cdot 100\% / \sum_{j=1}^{k_j} \overline{\Phi}^{i-1}; \quad i = 1, \dots, k_j; \quad j = 1, \dots, k_j; \quad i \leq j, \quad (27)$$

где  $\overline{\Phi}$  – процентное соотношение распределяемого ресурса относительно 100 % (при  $k_j = 1$ ) для  $i$ -х независимых путей в порядке их возрастания.

Модуль оценки временных и материальных ресурсов, необходимых для реализации сформированной структуры ТС, описывает критериальную часть решения задачи распределения ресурсов (людских, материальных, временных) (28) для реализации принятого варианта структуры ТС.

$$\Phi_{\text{крит}} = \min_i \left( \frac{R_i}{\alpha_r} + \frac{s(R_i)}{\alpha_s} + \frac{T(R_i)}{\alpha_t} \right), i = \overline{1, n}, \quad (28)$$

где  $R_i$  – необходимые ресурсы;

$s(R_i)$  – стоимость;

$T(R_i)$  – время выполнения этих работ с привлечением оптимального количества ресурсов;

$\alpha_r, \alpha_s, \alpha_t$  – нормирующие коэффициенты, определяемые с применением способа Фишборна;

$n$  – количество работ.

Предложенная математическая модель отличается наличием в ней элементов, описывающих не только синтез, но и реконструкцию ТС, в том числе для случаев влияния на нее ВДФ, а также рациональное распределение временных и материальных ресурсов. Это позволяет использовать модель как на этапах планирования сети, так и на этапах оперативного управления сетью.

Методика формирования структуры ТС базируется на предложенной математической модели. Она предназначена для формирования рациональной структуры ТС ТКС СН, учитывающей условия ее применения. Целью разработки методики является повышение оперативности и обоснованности принятия решений должностными лицами по связи по варианту структуры ТС. Методика состоит из совокупности логически взаимосвязанных этапов (рисунок), отражающих синтез и реконструкцию структуры сети, и трех общих последовательно выполняемых процедур:

- оценка внешних дестабилизирующих факторов;
- распределение узлового и линейного ресурсов;
- оценка временных и других материальных ресурсов.

Непосредственно синтез структуры ТС заключается в формировании топологической и потоковой структур сети. Процедуру формирования топологической структуры ТС предложено реализовать с применением модифицированного комбинаторного подхода с использованием нижней оценки стоимости при наличии ограничений на структурную устойчивость сети [2]. Применение данного подхода позволяет существенно (примерно в 1,5 раза) сократить поиск рационального варианта решения задачи.

Процедура формирования потоковой структуры ТС реализуется с использованием метода базового распределения нагрузок (ресурсов) на основе «золотой» пропорции [3]. Ее формирование начинается с анализа графа, описывающего топологическую структуру сети, выработанную на предыдущем этапе. По найденным кратчайшим путям между корреспондирующими парами узлов проводится распределение потоков информации пользователей путем прямого и обратного

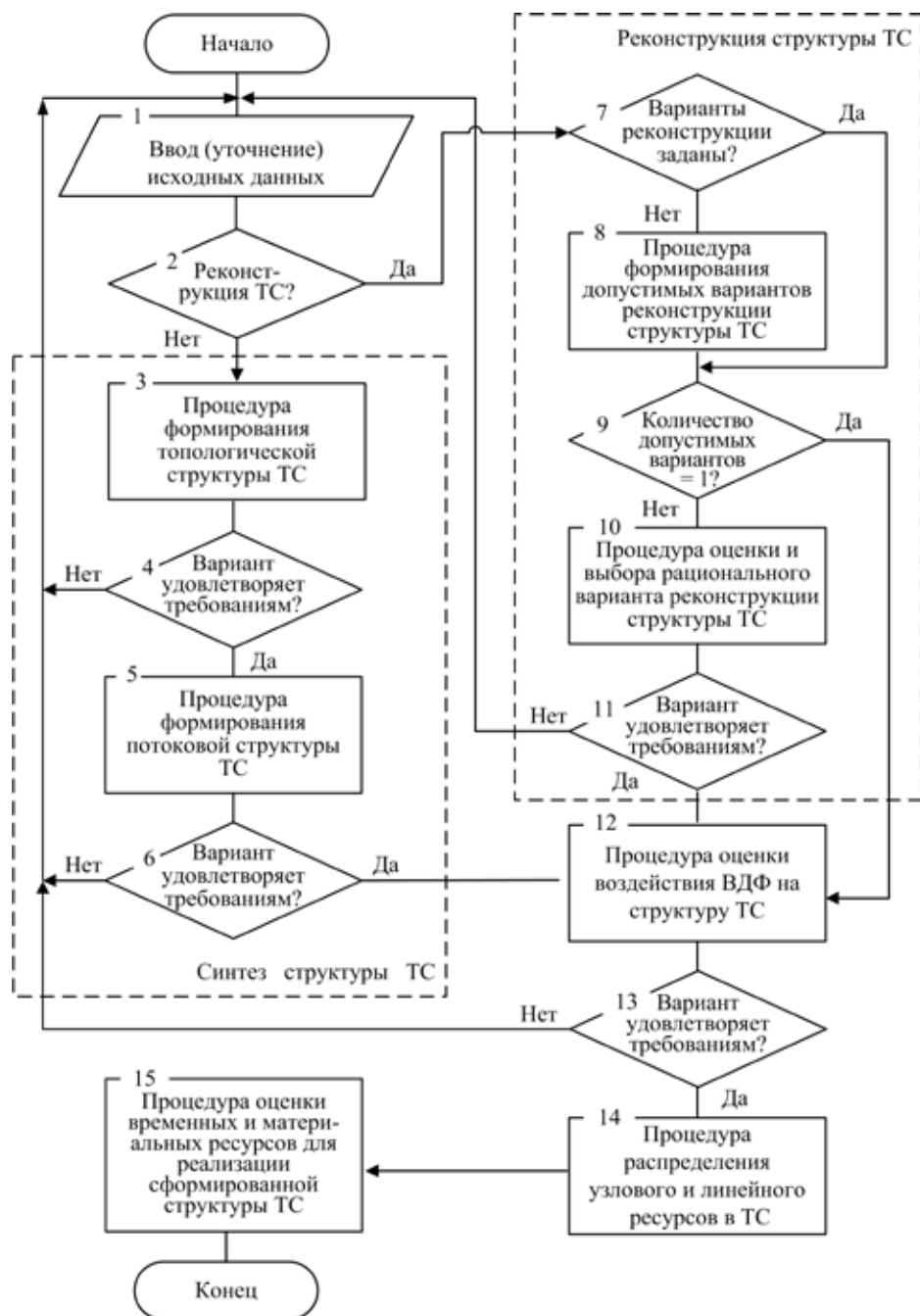


Рисунок. Обобщенная схема методики формирования структуры ТС

преобразования непараллельно-последовательной структуры исходного графа в параллельно-последовательную структуру и определения значений соотношения распределяемых потоков информации пользователей ТС по независимым путям с учетом значения требуемого коэффициента связности. В итоге определяются пропускные способности линий передачи ТС.

Реконструкция структуры ТС включает две процедуры:

- формирование допустимых вариантов реконструкции структуры сети;
- оценка и выбор рационального варианта реконструкции сети.

В процедуре формирования допустимых вариантов реконструкции сети предлагается использовать полиномиальный алгоритм нахождения заданного числа лучших решений [4]. В этом алгоритме переход от одного плана решения задачи к другому осуществляется с понижением значения целевой функции до тех пор, пока целевые условия не войдут в заданные ограничения. С применением указанного метода осуществляется построение невозрастающей последовательности максимальных потоков через сеть, где каждый член последовательности соответствует некоторому плану реконструкции сети, для которого выполняется ограничение по пропускной способности и стоимости реализации. Достоинство метода состоит в том, что при поиске рационального решения не рассматриваются заведомо не пригодные решения, не укладывающиеся в последовательность.

В основе процедуры оценки и выбора рационального варианта реконструкции сети предложено использовать способ многопараметрической оценки по множеству показателей. Выбор рационального варианта осуществляется по критерию максимума значения обобщенного показателя качества, расчет которого выполняется с использованием аддитивной свертки значений комплексных показателей качества по группам существенных и несущественных частных показателей качества структуры ТС.

Процедура оценки воздействия ВДФ на структуру ТС обеспечивает проверку синтезированного (при планировании связи) или разработанного (при реконструкции) рационального варианта структуры ТС на соответствие предъявленным требованиям к воздействию на нее ВДФ. Выбор рационального варианта структуры ТС осуществляется по критерию максимума, в основе которого используется значение вероятности своевременной доставки пакетов, полученное с применением аппарата топологического преобразования стохастических сетей [5].

В процедуре распределения узлового и линейного ресурсов выбор средств сетевого оборудования предложено осуществить по критерию максимума значения обобщенного показателя качества каждого средства. Распределение систем передачи предложено осуществить с применением метода базового распределения нагрузок (ресурсов) на основе «золотой» пропорции [3]. Окончательное системотехническое решение по варианту построения ТС принимается после оценки соответствия вероятностно-временных характеристик информационного обмена пользователей ТКС СН требованиям. Вероятностно-временные характеристики предложено рассчитывать способом аппроксимации с применением семейства распределений Пирсона.

В основе процедуры оценки временных и материальных ресурсов для реализации структуры ТС лежит способ минимизации значения многомерного вектора, включающего минимальное количество ресурсов, их стоимость и время выполнения всего комплекса работ по формированию ТС [6]. Задачу в такой постановке предложено решить с применением теоретико-графовых моделей, базирующихся на методах дискретной математики. Это позволяет находить рациональное решение без поиска всех эквивалентных решений, исключая их перебор.

Таким образом, представленная методика позволяет сформировать рациональный вариант структуры ТС, соответствующий прогнозируемым условиям ее применения, и отличается комплексным подходом к синтезу и реконструкции сети, учетом условий ее функционирования, рациональным распределением ресурсов, возможностью ее применения как на этапе планирования, так и на этапах оперативного управления сетью.

Использование предложенной математической модели структуры ТС и представленных средств методики формирования структуры ТС позволяет комплексировать расчетные процедуры в математическом и программном обеспечении типового комплекса средств автоматизированного управления связью и на этой основе обеспечивать принятие обоснованных решений в ходе планирования и эксплуатации транспортных сетей ТКС СН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столярова М.И. Задача формирования структуры транспортной сети связи и ее математическая модель // Сб. научных статей «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». Под ред. С.М. Доценко. – СПб.: Издательство СПбГУТ, 2013. – С. 514–518.
2. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
3. Ясинский С.А. Прикладная «золотая» математика и ее приложения в электросвязи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 239 с.
4. Першин О.Ю. Метод нахождения последовательности лучших решений для задач оптимизации на конечных множествах и задача реконструкции сети // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 6. – С. 73–84.
5. Столярова М.И., Привалов А.А. Модель процесса передачи пакетов данных по IP-сети в нестационарных условиях // Телекоммуникационные технологии. – 2006. – № 2 – С. 83–89.
6. Хадонов З.М. Теоретико-графовые модели информационных технологий при распределении ресурсов // Информационные технологии. – 1997. – № 10. – С. 31–34.