

УДК 621.391

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОЭТАПНОГО СТРУКТУРНОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ



В.Л. СТЕРИН

Акционерное общество «Киевстар»

Abstract – In given article have proposed technical-economic model of multi-stage structural and functional synthesis of telecommunications network (TCN). The model is represented by a system of linear differential and algebraic equations for TCN states. The model comprehensively and interconnected describes processes: topology choosing (TC) and trunk bandwidth calculation (TBC) problem for transport telecommunications network (TTCN), traffic distribution (TD) and traffic shaping (TS) which incoming to transport network and access networks connection problem (ANCP) to the edge nodes of transport telecommunications network. Variables of solving problems are parameters that associated with the distribution of investments between the stages of telecommunication systems creation and parameters that define technological features of the agreed solutions of problems: TC, TBC, TD, TS and ANCP, which is an important advantage of the proposed solutions. Structural and functional synthesis problem is presented as optimization problem, and the choice of optimality criterion allowed to provide accounting for contingent expenses negotiated solution of problems that listed above. Kind of criterion in the presence of dynamic constraints allowed to classify formulated optimization problem as a problem of optimal control of a dynamic system that has defined the list used for its solution methods.

Анотація – Запропоновано техніко-економічну модель багатоетапного структурного та функціонального синтезу телекомунікаційної мережі (ТКМ). Модель представлена системою лінійних різницевих і алгебраїчних рівнянь стану ТКМ. У рамках моделі взаємопов'язано описуються процеси вибору топології (ВТ) і пропускної здатності трактів передачі (ВПЗ ТП) транспортної телекомунікаційної мережі (ТТКМ), розподілу потоків (РП) і обмеження трафіку (ОТ), що надходить у транспортну мережу, а також підключення мереж доступу (ПМД) до приграничних вузлів ТТКС. Керуючими виступають як змінні, пов'язані з розподілом капіталовкладень між етапами проектування ТКМ, так і параметри, що визначають технологічні особливості узгодженого розв'язання задач ВТ, ВПЗ ТП, РП, ОТ і ПМД, що є важливою перевагою запропонованого рішення.

Анотация – Предложена технико-экономическая модель многоэтапного структурного и функционального синтеза телекоммуникационной сети (ТКС). Модель представлена системой линейных разностных и алгебраических уравнений состояния ТКС. В рамках модели взаимосвязано описываются процессы выбора топологии (ВТ) и пропускных способностей трактов передачи (ВПС ТП) транспортной телекоммуникационной сети (ТТКС), распределения потоков (РП) и ограничения трафика (ОТ), поступающего в транспортную сеть, а также подключения сетей доступа (ПСД) к приграничным узлам ТТКС. В качестве управляющих выступают как переменных, связанные с распределением капиталовложений между этапами проектирования ТКС, так и параметры, определяющие технологические особенности согласованного решения задач ВТ, ВПС ТП, РП, ОТ и ПСД, что является важным преимуществом предлагаемого решения.

Введение

Традиционно в телекоммуникациях эффективность решения задач по обеспечению качества обслуживания (Quality of Service, QoS) во многом определяется объемом и, что немаловажно, доступностью сетевых ресурсов, в качестве которых, как правило, выступают разветвленная инфраструктура, пропускная способность трак-

тов передачи, буферная емкость маршрутизаторов и др. [1, 2]. При этом необходимый запас сетевого ресурса закладывается именно на этапе проектирования телекоммуникационных сетей (ТКС), который должен основываться на согласованном решении следующих основных взаимодополняющих друг друга задач (рис. 1):

- 1) определение местоположения и характеристик узлов транспортной ТКС (ТТКС);
- 2) установление порядка подключения сетей доступа и (или) отдельных абонентов к приграничным узлам транспортной сети;
- 3) выбор топологии (ВТ) транспортной сети;
- 4) выбор пропускных способностей трактов передачи (ВПС ТП) транспортной ТКС;
- 5) распределение потоков (РП) в транспортной сети;
- 6) перераспределение трафика, поступающего от сетей доступа, между несколькими приграничными узлами ТТКС;
- 7) ограничение трафика, поступающего от сетей доступа (СД) на приграничные узлы ТТКС, ввиду невозможности его обслуживания с заданным уровнем QoS.



Рис. 1. Перечень основных задач проектирования ТКС

На практике распространенным является подход, основанный на последовательном решении большинства из перечисленных задач (рис. 1) [3-5], что объясняется сложностью их формализации и решения в рамках единой математической мо-

дели. В лучшем случае удавалось обеспечить согласованное решение задач 1.3, 2.2 и 2.3 из перечня, представленного на рис. 1 [6, 7]. В работах [8, 9] удалось формализовать в рамках единой модели решение задач 1.3, 2.2, 2.3 и 2.5 (рис. 1).

Важно отметить, что кроме технологических решений важно теоретически обосновать и экономическую составляющую процесса проектирования ТКС. Как правило [3-7], задачи проектирования формулируются в оптимизационной постановке, где, в лучшем случае, весовые коэффициенты целевой функции так или иначе связаны с условной стоимостью наращивания структурного и (или) функционального ресурса проектируемой ТКС. Подобный подход конечно же не обеспечивает необходимую адекватность описания процесса распределения капиталовложений и их ограниченность при структурно-функциональном синтезе ТКС, не учитывает его протяженность во времени и т.д. В этой связи в работах [8, 9] процесс структурно-функционального синтеза ТКС описывается с помощью динамической модели, представленной разностными уравнениями состояния транспортной сети, дополненных алгебраическими уравнениями и неравенствами. В рамках данной модели осуществлена попытка комплексно описать и обеспечить эффективное решение задач, связанных со статическим [8] и динамическим [9] распределением капиталовложений между этапами проектирования, а также технологических задач 1.3, 2.2, 2.3 и 2.5 (рис. 1). В данной статье предлагается сохранить технико-экономическую постановку задачи, расширив потенциал модели, рассмотренной в работах [8, 9], за счет добавления в перечень решаемых с ее помощью задач следующих функциональных возможностей:

- установление порядка подключения сетей доступа и (или) отдельных абонентов к приграничным узлам транспортной сети (задача 1.2);
- перераспределение трафика, поступающего от сетей доступа, между несколькими приграничными узлами ТТКС (задача 2.4).

I. Технико-экономическая модель многоэтапного структурного и функционального синтеза телекоммуникационной сети

При усовершенствовании динамической модели структурного и функционального синтеза телекоммуникационной сети оставим в силе большинство из принятых в работах [8, 9] допущений, связанных с тем, что известно заранее фиксированное месторасположение узлов (маршрутизаторов) транспортной ТКС и сетей доступа (или отдельных абонентов), а также потенциальные возможности по физической коммутации как узлов ТТКС между собой, так и абонентов (сетей доступа) к этим узлам.

Тогда вероятную структуру ТКС можно охарактеризовать графом $G(R, L)$ (рис. 2), множество вершин которого $R = R^* \cup R^{**}$ описывает узлы проектируемой ТТКС $R^* = \{R_i^*, i = \overline{1, N}\}$, где R_i^* – i -й узел проектируемой транспортной сети, N – их общее число; а также множество сетей доступа $R^{**} = \{R_j^{**}, j = \overline{1, M}\}$, где R_j^{**} – j -я сеть доступа проектируемой ТКС, M – их общее число. Множество дуг $L = L^* \cup L^{**}$ графа

описывает предполагаемые тракты передачи между узлами ТТКС $L^* = \{L_{i,j}^*; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ и линии доступа $L^{**} = \{L_{m,s}^{**}; m = \overline{1, M}; s = \overline{1, N}\}$ между отдельными сетями доступа и приграничными узлами ТТКС, возможность создания которых заложена в ходе проектирования. Например, $L_{i,j}^*$ – создаваемый тракт передачи (ТП) между i -м и j -м узлами транспортной сети, а $L_{m,s}^{**}$ – возможная линия доступа (ЛД) от m -й СД до s -го узла транспортной сети.

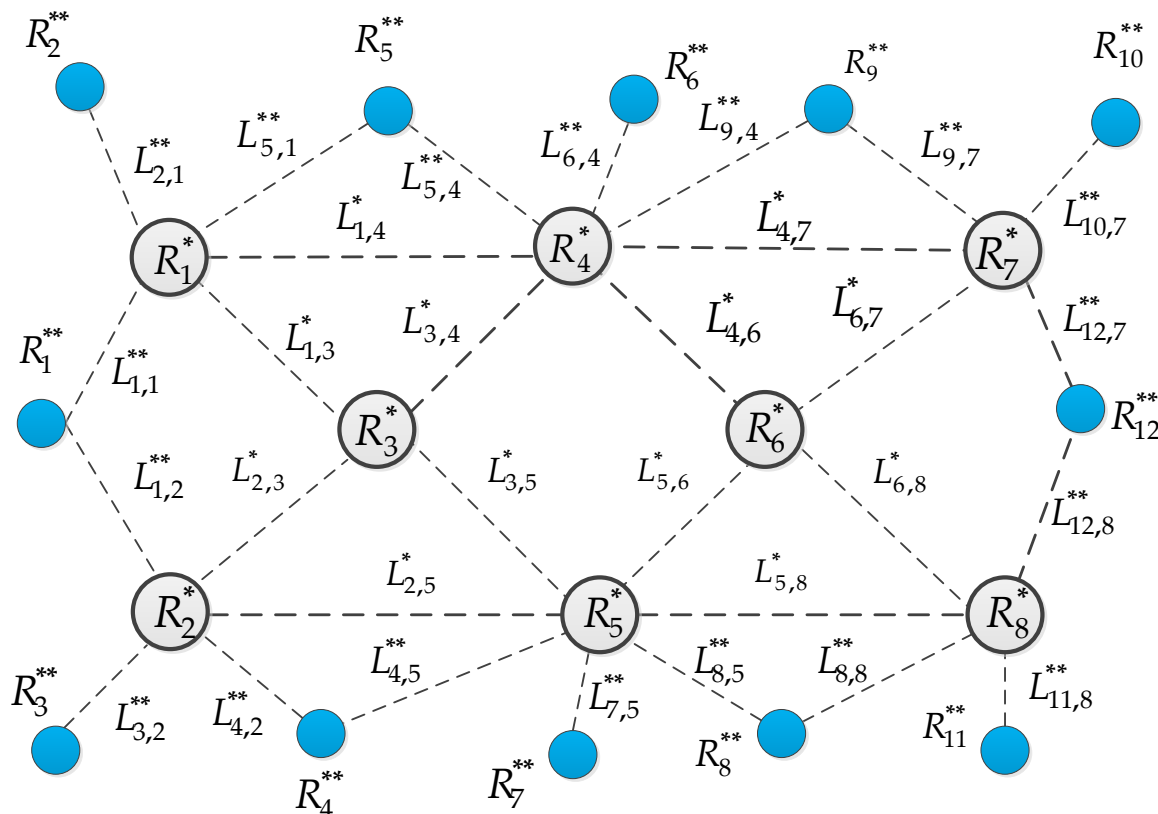


Рис. 2. Пример графа $G(R, L)$

Так, из представленного рис. 2 следует, что первая сеть доступа может быть подключена к первому и (или) второму приграничным узлам транспортной сети, а четвертая СД – ко второму и (или) пятому узлам ТТКС. В ходе решения поставленной задачи относительно структурного и функционального синтеза ТКС некоторые из приведенных ТП и ЛД будут созданы, а некоторые нет.

Кроме того, предположим, что известны следующие исходные данные:

Q – общий объем капиталовложений в создаваемую ТТКС, измеряемый, например, в гривнах;

$D = \{D_{m,l}^h; h = \overline{1, H}; m, l = \overline{1, M}; m \neq l\}$ – множество трафиков, поступающих в ТТКС от отдельных абонентов или сетей доступа, где $D_{m,l}^h$ – h -й трафик, передаваемый между сетями доступа R_m^{**} и R_l^{**} ;

K – число временных интервалов (этапов) в процессе проектирования ТКС;
 $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – средняя длительность одного этапа (временного интервала) структурно-функционального синтеза ТКС, t_k и t_{k+1} – времена начала и окончания k -го временного интервала;

$b_{i,j}(k)$ – удельная стоимость ввода в строй единицы пропускной способности ТП $L_{i,j}^*$ сети на k -м временном интервале, измеряемая в $грн/(бит/c)$; $k = \overline{1, K}$;

$a_{i,j}(k)$ – коэффициент потерь (снижения) пропускной способности ТП $L_{i,j}^*$ за k -й временной интервал;

$r_{m,l}^h(k)$ – средняя интенсивность входного трафика $D_{m,l}^h$ на k -м временном интервале ($бит/c$).

Введем также следующие обозначения для рассчитываемых в ходе структурно-функционального синтеза ТКС величин:

$c_{i,j}(k)$ – пропускная способность (ПС) создаваемого ТП $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале ($бит/c$);

$q_{i,j}(k)$ – объем капиталовложений, выделенных на наращивание ПС тракта передачи $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале ($грн$);

$u_{i,j}(k)$ – доля капиталовложений, выделенных на k -м временном интервале на наращивание ПС ТП $L_{i,j}^*$.

Динамику изменения структурных и функциональных параметров проектируемой ТКС в ходе решения задач ВТ и ВПС можно описать следующей системой разностных уравнений [9]:

$$c_{i,j}(k+1) = a_{i,j}(k)c_{i,j}(k) + Qu_{i,j}(k)g_{i,j}(k), \quad (1)$$

где $i, j = \overline{1, N}; i \neq j$; $g_{i,j}(k) = 1/b_{i,j}(k)$, $\Delta c_{i,j}(k) = Qu_{i,j}(k)g_{i,j}(k)$ – приращение ПС ТП $L_{i,j}^*$ за k -й временной интервал.

Тогда в ходе решения задачи структурно-функционального синтеза ТКС необходимо обеспечить выполнение следующих важных условий-неравенств:

$$0 \leq \Delta c_{i,j}(k) \leq \Delta c_{i,j}^{\max}(k), \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{L_{i,j}} u_{i,j}(k) \leq 1. \quad (3)$$

Параметр $\Delta c_{i,j}^{\max}(k)$ в выражении (2) численно характеризует максимально возможную величину приращения ПС тракта передачи $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале. Величина порога $\Delta c_{i,j}^{\max}(k)$ во многом зависит как от организационно-технических возможностей организации, осуществляемой проектирование ТКС, так и от используемой телекоммуникационной технологии и доступного ресурса по времени

($\Delta t = t_{k+1} - t_k$). Выполнение условия (3) обусловлено ограниченностью финансирования (Q) на создание ТКС. Это условие можно представить в расширенной форме:

$$\sum_{k=1}^K q(k) \leq Q; \quad q(k) = Q \sum_{(i,j)} u_{i,j}(k); \quad q_{i,j}(k) = Qu_{i,j}(k),$$

где параметр $q(k)$ характеризует управляемую величину выделяемых капиталовложений на проектирование ТКС в ходе k -го временного интервала (этапа).

В ряде случаев может возникнуть необходимость во введении ограничения

$$0 \leq q(k) \leq q^{\max}(k), \quad (4)$$

когда максимальный объем финансирования k -го этапа проектирования ограничен.

Пропускные способности $c_{i,j}(k)$ трактов передачи в системе уравнений (1) трактуются как переменные состояния процесса структурно-функционального синтеза ТКС. Управляющие переменные $u_{i,j}(k)$ контролируют процесс перераспределения капиталовложений как на создание отдельных ТП, так и на наращивание их пропускной способности на различных временных этапах проектирования.

С точки зрения формализации задач распределения трафика на уровне транспортной сети (маршрутизации) и сетей доступа в дополнение к вышеизложенному с каждым трафиком кроме его средней интенсивности ($r_{m,l}^h(k)$) будет связан еще ряд ключевых параметров: $\bar{R}^*(D_{m,l}^h)$ – множество приграничных узлов ТТКС, которые потенциально могут быть соединены линиями доступа с СД, выступающей в качестве источника трафика $D_{m,l}^h \in D$; $\bar{R}^*(D_{m,l}^h)$ – множество приграничных узлов транспортной сети, к которым может быть подключена сеть доступа, являющаяся получателем для трафика $D_{m,l}^h \in D$. Дополнительными управляющими переменными служат следующие:

$x_{i,j}^h(k)$ – маршрутная переменная, которая характеризует долю интенсивности h -го трафика, который протекает в тракте $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале;

$y_{m,i}^h(k)$ – величина, которая определяет долю интенсивности h -го трафика, который поступает от СД R_m^{**} на приграничный узел R_i^* ТТКС на k -м временном интервале;

$z_{j,l}^h(k)$ – величина, которая характеризует долю интенсивности h -го трафика, который убывает из ТТКС через приграничный узел R_j^* в сеть доступа R_l^{**} на k -м временном интервале.

Введенные управляющие переменные связаны между собой следующими условиями сохранения потока в ТКС:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:L_{i,j}^* \in L^*} x_{i,j}^h(k) - \sum_{j:L_{j,i}^* \in L^*} x_{j,i}^h(k) = 0 \text{ при } D_{m,l}^h \in D, R_i^* \notin \widehat{R}^*(D_{m,l}^h) \cup \widetilde{R}^*(D_{m,l}^h); \\ \sum_{j:L_{i,j}^* \in L^*} x_{i,j}^h(k) - \sum_{j:L_{j,i}^* \in L^*} x_{j,i}^h(k) = y_{m,i}^h(k) \text{ при } D_{m,l}^h \in D, R_i^* \in \widehat{R}^*(D_{m,l}^h); \\ \sum_{j:L_{i,j}^* \in L^*} x_{i,j}^h(k) - \sum_{j:L_{j,i}^* \in L^*} x_{j,i}^h(k) = -z_{i,l}^h(k) \text{ при } D_{m,l}^h \in D, R_i^* \in \widetilde{R}^*(D_{m,l}^h), \end{array} \right. \quad (5)$$

а также условиями недопущения перегрузки трактов передачи ТТКС в ходе маршрутизации трафика (РП):

$$\sum_{D_{m,l}^h \in D} r_{m,l}^h(k) x_{i,j}^h(k) \leq c_{i,j}(k); L_{i,j}^* \in L^*. \quad (6)$$

В соответствии с физикой решаемой задачи (5), (6) на маршрутные переменные накладываются ограничения

$$x_{i,j}^h(k) \in \{0,1\} \quad (7)$$

при моделировании процессов однопутевой маршрутизации или

$$0 \leq x_{i,j}^h(k) \leq 1 \quad (8)$$

при описании многопутевой маршрутизации в ходе решения задачи РП.

На дополнительно введенные управляющие переменные также накладывается ряд ограничений, связанных с реализацией вновь вводимого функционала по обеспечению решения задачи 1.2 (рис. 1). Ограничение вида

$$y_{m,i}^h(k) \in \{0,1\} \quad (9)$$

вводится в том случае, когда h -й трафик от СД R_m^{**} может поступать лишь на один из приграничных узлов из множества $\widehat{R}^*(D_{m,l}^h)$. Если же допускается, что одна сеть доступа может коммутироваться одновременно к нескольким приграничным узлам, то имеет место следующее условие

$$0 \leq y_{m,i}^h(k) \leq 1. \quad (10)$$

Аналогично (7) и (8) вводятся условия-ограничения для переменных $z_{i,l}^h(k)$:

$$z_{i,l}^h(k) \in \{0,1\} \quad (11) \quad \text{и} \quad 0 \leq z_{i,l}^h(k) \leq 1. \quad (12)$$

Для обеспечения решения задач 1.2 и 2.4 (рис. 1) необходимо также ввести в структуру модели условия:

$$\sum_{R_i^* \in \widehat{R}^*(D_{m,l}^h)} y_{m,i}^h(k) \leq 1, \quad D_{m,l}^h \in D, \quad (13)$$

определяющие особенности распределение h -го трафика, поступающего от СД R_m^{**} , между множеством приграничных узлов $\widehat{R}^*(D_{m,l}^h)$ ТТКС. Причем, если имеет место равенство

$$\sum_{R_i^* \in \widehat{R}^*(D_{m,l}^h)} y_{m,i}^h(k) = 1, \quad (14)$$

то гарантируется отсутствие ограничения трафика при его распределении по приграничным узлам ТТКС. В противном случае ограничение трафика допускается.

При решении задач, связанных с необходимостью подключения каждой сети доступа лишь к одному из приграничных узлов ТТКС (9), (11) и распределением трафика на этом участке сети, в ряде случаев важно обеспечить использование единой ЛД при передаче исходящего и входящего для данной сети доступа трафика. В этой связи для каждой (для примера R_m^{**}) сети доступа надо выполнить условие

$$\sum_{R_i^* \in \widehat{R}^*} \left[\prod_h y_{m,i}^h(k) \right] \left[\prod_h z_{m,i}^h(k) \right] = 1, \quad (15)$$

которое справедливо при отсутствии ограничения трафика (14) и получено на основе объединения условий

$$\sum_{R_i^* \in \widehat{R}^*} \prod_h y_{m,i}^h(k) = 1 \quad (16) \quad \text{и} \quad \sum_{R_i^* \in \widehat{R}^*} \prod_h z_{m,i}^h(k) = 1. \quad (17)$$

Выполнение условия (16) гарантирует коммутацию сети доступа R_m^{**} лишь к одному приграничному узлу при обслуживании множества трафиков, для которых данная сеть является источником. Выполнение же условия (17) также ориентирует на использование лишь одной ЛД при приеме пакетов трафиков, для которых СД R_m^{**} является получателем.

В случае необходимости частичного ограничения трафика, поступающего от СД на один приграничный узел ТТКС, условие (15) примет более общую форму

$$\sum_{R_i^* \in \widehat{R}^*} \left[\prod_h \lceil y_{m,i}^h(k) \rceil \right] \left[\prod_h \lceil z_{m,i}^h(k) \rceil \right] = 1, \quad (18)$$

где $\lceil \cdot \rceil$ – знак округления к ближайшему большему целому.

Критерий оптимальности структурного и функционального синтеза телекоммуникационной сети

В качестве критерия оптимальности получаемых в результате структурного и функционального синтеза решений предлагается использовать минимум следующего стоимостного функционала:

$$J = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{L_{i,j}^* \in L^*} v_{i,j}(k) c_{i,j}(k) + \sum_{D_{m,l}^h \in D} \sum_{L_{i,j}^* \in L^*} f_{i,j}^h(k) x_{i,j}^h(k) + \sum_{D_{m,l}^h \in D} w_{m,l}^h(k) r_{m,l}^h(k) \left(1 - \sum_{R_i^* \in \bar{R}^*(D_{m,l}^h)} y_{m,i}^h(k) \right) \right], \quad (19)$$

в котором $v_{i,j}(k)$ – относительная стоимость использования единицы пропускной способности тракта передачи $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале; $f_{i,j}^h(k)$ – маршрутная метрика ТП $L_{i,j}^*$ при передаче h -го трафика в ТТКС на k -м временном интервале; $w_{m,l}^h(k)$ – удельная прибыль от обслуживания сетью h -го трафика на k -м временном интервале, измеряемая в грн/(бит/с).

Тогда в функционале (19) слагаемое $\sum_{L_{i,j}^* \in L^*} v_{i,j}(k) c_{i,j}(k)$ оценивает условные затраты

на использование ПС ТП проектируемой транспортной сети, слагаемое $\sum_{L_{i,j}^* \in L^*} f_{i,j}^h(k) x_{i,j}^h(k)$ характеризует относительную стоимость реализации функций

маршрутизации (РП) в ходе проектирования ТТКС; а выражение

$$\sum_{D_{m,l}^h \in D} w_{m,l}^h(k) r_{m,l}^h(k) \left(1 - \sum_{R_i^* \in \bar{R}^*(D_{m,l}^h)} y_{m,i}^h(k) \right)$$

численно определяет потери в прибыли ввиду отказов в обслуживании поступающего от СД в ТТКС трафика. Таким образом, в функционале (19) произведен учет суммарных затрат при согласованном решении задач, связанных с установлением порядка подключения сетей доступа и (или) отдельных абонентов к приграничным узлам транспортной сети (задача 1.2), выбором топологии (задача 1.3) и пропускных способностей трактов передачи (задача 2.2), распределением потоков в ТТКС (задача 2.3) и на границе сети (задачи 2.4 и 2.5). При этом, если выбрать $w_{m,l}^h \gg f_{i,j}^h$ и $w_{m,l}^h \gg v_{i,j}$, то отказы в обслуживании в рамках модели (1)-(19) будут обусловлены лишь нехваткой сетевых ресурсов, накопленных на k -м временном интервале при проектировании ТКС.

Выводы

В статье предложено усовершенствование ранее известной [8, 9] технико-экономической модели структурного и функционального синтеза ТКС. Предлагаемая модель (1)-(19) обеспечивает комплексное описание и нацеливает на согласованное решение в ходе проектирования ТКС ключевых задач структурного и функционального синтеза, в число которых *впервые* удалось включить задачи по установлению порядка подключения сетей доступа и (или) отдельных абонентов к приграничным узлам транспортной сети (задача 1.2) и перераспределению трафика, поступающего от сетей доступа, между несколькими приграничными узлами ТТКС (задача 2.4).

Модель (1)-(19) относится к классу динамических моделей и представлена системой линейных разностных уравнений состояния ТТКС (1), в которых в качестве переменных состояния выбраны пропускные способности трактов передачи транс-

портной сети, а переменными управления выступали величины, регламентирующие распределение капиталовложений на наращивание структуры и ПС ТП между этапами проектирования ТКС. Важное место в структуре модели играют алгебраические уравнения и неравенства, описывающие условия сохранения потока в ТКС и СД (5), которые претерпели некоторую модификацию ввиду необходимости описания задач 1.2 и 2.4 из перечня, приведенного на рис. 1.

Использование минимизируемого функционала (14) позволяет обеспечить учет условных затрат на решения практически всех приведенных на рис. 1 задач. Форма критерия при наличии динамического ограничения (1) позволила классифицировать сформулированную оптимизационную задачу как задачу оптимального управления динамической системой, что определяет необходимость использования для ее решения соответствующих методов [10]. Ввиду наличия интегральных ограничений на переменные управления (3), то целесообразно необходимые и достаточные условия оптимальности получить с помощью принципа максимума Понтрягина или метода динамического программирования Беллмана, а расчет конечных значений искомых параметров осуществлять с использованием численных методов.

Список литературы:

1. Кенyon T. High-Performance Data Network Design. Design Techniques and Tool. – Digital Press, Butterworth–Heinemann. – 2002. – 623 p.
2. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения / Ю.В. Семенов. – С.Пб.: Наука и техника, 2005. – 240 с.
3. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
4. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов. – М.: Радио и связь. – 1986. – 408 с.
5. Зайченко Ю.П. Структурная оптимизация сетей ЭВМ / Ю.П. Зайченко, Ю.В. Гонга. – К.: Техника, 1986. – 168 с.
6. Pióro M., Medhi D. Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks. – Morgan Kaufmann, 2004. – 765 p.
7. Pedersen M.B. Optimization models and solution methods for intermodal transportation // PhD Thesis, REPORT 2005-3 / Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark. – 171 p. – Режим доступа: http://www1.ctt.dtu.dk/personal/mbp/MBP_PhD_Thesis.pdf.
8. Лемешко А.В. Динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной ТКС [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, В.Л. Стерин // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 8 – 17. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_lemeshko_synthesis.pdf.
9. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Оптимизация структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 9 (107). – С. 186-190.
10. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.