

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СЕТЕВОГО УРОВНЯ ЭМВОС В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ

*А.Г. Беленков, В.Ф. Столбов, канд. техн. наук, И.Ф. Пустовойтов*

*Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба*

Рассматривается подход к согласованному решению задач сетевого уровня ЭМВОС в телекоммуникационных сетях. Предлагается математическая модель телекоммуникационной сети, формализующая процессы маршрутизации, ограничения внутрисетевого трафика и трафика, поступающего в сеть от ее абонентов.

\* \* \*

Розглядається підхід до погодженого розв'язання задач мережного рівня ЕМВВС у телекомунікаційних мережах. Пропонується математична модель телекомунікаційної мережі, що формалізує процеси маршрутизації, обмеження міжвузлового трафіку та трафіку, що надходить у мережу від її користувачів.

\* \* \*

The approach to the matched problem solving of a network layer OSI in telecommunication networks is considered. The mathematical model of a telecommunication network formalizing processes of routing, limiting internal and external traffic.

### Введение

Построение и развитие телекоммуникационных сетей (ТКС) военного назначения связано с переходом от множественных специализированных сетей электросвязи к интегральным сетям, которые обеспечивают совместную доставку передаваемой информации в единой цифровой форме данных [1]. С точки зрения структурной организации в ТКС военного назначения выделяются транспортная сеть магистрального сегмента (МС) и ряд абонентских сетей (АС), сопрягаемых с первыми с использованием сетей доступа.

*Анализ известных достижений.* Как показывает опыт проектирования и эксплуатации сетей связи общего и специального предназначения, большинство из них по принципам своего структурно-функционального построения в той или иной степени придерживаются рекомендаций эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Передовые телекоммуникационные технологии территориально-распределенных сетей, т.е. сетей уровня WAN (*Wide-Area Network*) [2], не всегда сохраняют семиуровневый характер стека своих информационных протоколов обмена, но в них как правило при-

сутствует уровень, соответствующий сетевому уровню ЭМВОС, что говорит о его обязательности и чрезвычайной важности. Основные задачи, возложенные на сетевой уровень ЭМВОС, соответствуют функциям подсистемы динамического управления (рис.1) автоматизированной системы управления сетью (АСУС) [3], которая создается для поддержания заданного количества обслуживания абонентов и функционально дополняет ТКС до целостной системы телекоммуникаций.

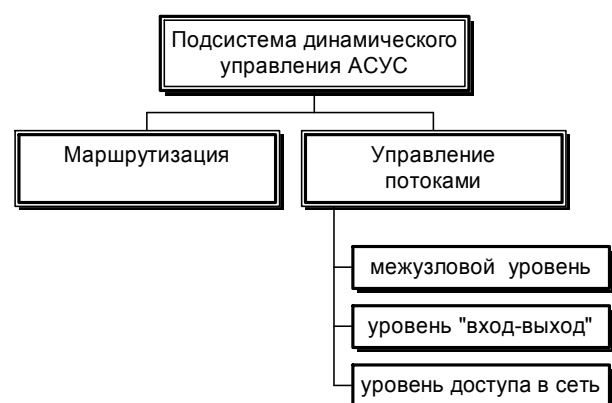


Рис. 1. Функции подсистемы динамического управления

Подсистема динамического управления оценивает производительность маршрутизаторов, обеспечивает распределение потоков информации путем

согласованного решения задач маршрутизации и управления информационными потоками.

Управление потоками предназначено для определения порядка доступа в сеть и к ее внутренним ресурсам (маршрутизаторам и трактам передачи) с целью их наиболее эффективного использования и выполнения требований абонентов по уровню предоставляемых услуг. Выделяются следующие уровни управления потоками:

междуузловой уровень (ограничение внутрисетевого трафика или транзитной нагрузки), в функции которого входит управление потоком, поступающим на данный узел от смежных узлов;

уровень «вход-выход», регулирующий потоки между парой входной-выходной узел (для режима виртуальных соединений управляет потоком, поступающим по данному соединению);

уровень доступа в сеть (ограничение внешней нагрузки), управляющий внешним потоком, поступающим в сеть.

*Выделение нерешенной задачи.* С точки зрения системности получаемых решений перечисленных выше задач сетевого уровня ЭМВОС в процессе выработки необходимого управляющего воздействия АСУС должно обеспечиваться удовлетворение следующих важных требований – комплексность и согласованность, а также динамический характер решений. Основа успешной реализации этих требований должна закладываться уже на этапе постановки оптимизационной задачи структурного и (или) функционального синтеза.

*Цель статьи и постановка задачи.* Поэтому актуальной является задача адекватного математического описания ТКС в соответствии со сформулированными выше требованиями путем разработки соответствующей математической модели оптимизации решения задач сетевого уровня ЭМВОС.

### Математическое описание ТКС

Максимальная согласованность в решении комплекса задач сетевого уровня может быть дос-

тигнута лишь при использовании единой математической модели ТКС, формализующей процессы маршрутизации и управления потоками. Морфологическое описание ТКС целесообразно осуществить с помощью структурной ее модели, представленной в виде ориентированного графа  $\Gamma(R, Z)$  (рис.2). Множество вершин  $R = \{A\} \cup \{V\}$  графа  $\Gamma(R, Z)$  составляют АС ( $A_i, i = \overline{1, M}$ ) и узлы (маршрутизаторы) МС ( $V_j, j = \overline{1, N}$ ) ТКС, где  $M$  – общее количество абонентских сетей, а  $N$  – число узлов в МС ТКС;  $Z = \{S\} \cup \{D\}$  – множество дуг, моделирующее линии доступа ( $S_{i,j}; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}$ ) и тракты передачи данных между узлами МС ТКС ( $D_{i,j}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j$ ).

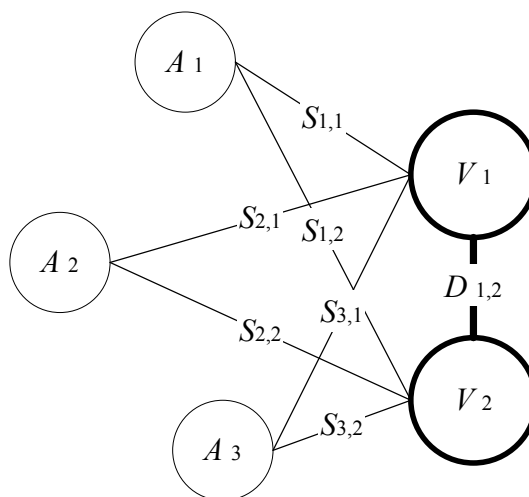


Рис. 2. Структурная модель ТКС

При разработке функциональной модели ТКС хорошо себя зарекомендовал подход, основанный на описании динамики состояния сети с помощью аппарата дифференциальных (разностных) уравнений. С целью разработки требуемой модели ТКС возьмем за основу динамическую модель решения маршрутных задач в сети [4], дополненную решением задач управления доступом [5]. Тогда модель сети в пространстве состояний можно представить системой неавтономных разностных управляемых урав-

нений, отражающей динамику загруженности буферов очередей на узлах МС ТКС [1]:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^N b_{i,l}^{(m)}(k) u_{i,l}^{j(m)}(k) + \\ + \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq i,j}}^N b_{m,i}^{(m)}(k) u_{m,i}^{j(m)}(k) + \sum_{p=1}^M b_{p,i}^{j(\kappa)}(k) u_{p,i}^{j(\kappa)}(k), \quad (1)$$

где  $x_{i,j}(k)$  – объем данных, находящийся на узле  $V_i$  и предназначенный для передачи узлу  $V_j$  в момент времени  $t_k$ , трактуемый в дальнейшем как переменная состояния;  $u_{i,l}^{j(m)}(k)$  – доля пропускной способности тракта  $D_{i,l}$ , выделенная абонентскому трафику с адресатом  $V_j$  в момент времени  $t_k$  и трактуемая в дальнейшем как маршрутная переменная;  $u_{p,i}^{j(\kappa)}(k)$  – доля абонентской нагрузки, которая поступила от  $p$ -й абонентской сети на узел  $V_i$  в момент времени  $t_k$  с адресатом  $V_j$  и трактуемая дальше как коммутационная переменная;  $b_{i,j}^{(m)}(k) = c_{i,j}(k)\Delta t$  ( $k=0,1,2,\dots$ ),  $c_{i,j}(k)$  – скорость передачи данных между узлами  $V_i$  и  $V_j$  в момент времени  $t_k$  в тракте  $D_{i,j}$ ;  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  – период перерасчета маршрутных и коммутационных переменных;  $b_{p,i}^{j(\kappa)}(k) = \zeta_{p,i}^j(k)\Delta t$ ,  $\zeta_{p,i}^j$  – интенсивность поступления данных к узлу  $V_i$  в момент времени  $t_k$  с адресатом  $V_j$  от  $p$ -й абонентской сети;

С целью недопущения перегрузки узлов сети и ее трактов передачи на переменные состояния и маршрутные переменные накладываются ограничения, связанные с задачей ограничения внутрисетевого трафика,

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

$$0 \leq u_{i,l}^{j(m)}(k); \quad \sum_{n=1}^N u_{i,l}^{n(m)}(k) \leq 1, \quad (3)$$

где  $x_{i,j}^{\max}$  – емкость буфера очередей на узле  $V_i$  для трафиков с адресатом  $V_j$ .

Исходя из физического смысла коммутационных переменных, на них накладываются ограничения

$$0 \leq u_{p,i}^{j(\kappa)}(k); \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{p,i}^{j(\kappa)}(k) = 1 \quad (p = \overline{1, M}; i, j = \overline{1, N}), \quad (5)$$

выполнение которых связано с задачей управления внешней нагрузкой (абонентским трафиком) путем ее распределения по приграничным маршрутизаторам МС ТКС с сохранением начального объема [5].

Рассмотренный выше фрагмент модели ТКС адекватно описывает динамику сети в условиях малых, средних и близких критическим нагрузкам, когда за счет удачного выбора маршрутных и коммутационных переменных удается обеспечить выполнение условий (1-5). Когда же пропускной способности ТКС для обслуживания абонентской нагрузки недостаточно, происходит перегрузка сети и корректно рассчитать переменные  $u_{i,l}^{j(m)}(k)$  и  $u_{p,i}^{j(\kappa)}(k)$  без нарушения условий (1-5) не представляется возможным.

Новизна предлагаемой модели ТКС состоит в том, что формализация процессов ограничения нагрузки, поступающей в МС ТКС от АС, обеспечивается путем замены ограничений (5) следующими ограничениями:

$$r_{p,i}^{j(\kappa)}(k) \leq \sum_{i=1}^N u_{p,i}^{j(\kappa)}(k) \leq 1, \quad (6)$$

где  $r_{p,i}^{j(\kappa)}(k)$  – часть нагрузки, поступающей от  $p$ -й абонентской сети на узел  $V_i$  в момент времени  $t_k$  с адресатом  $V_j$ , для которой осуществлено резервирование необходимых сетевых ресурсов.

Динамику информационного обмена в ТКС в целом на основе системы скалярных уравнений состояния (1) можно представить линейным векторно-матричным уравнением

$$X(k+1) = X(k) + B^{(m)}(k)U^{(m)}(k) + B^{(k)}(k)U^{(k)}(k), \quad (7)$$

где  $X(k) = [x_{1,2}(k), \dots, x_{i,j}(k), \dots, x_{N,N-1}(k)]^T$  – вектор загрузки буферных устройств на узлах МС ТКС в момент времени  $t_k$  размерности  $N(N-1)$ ;

$$U^{(m)}(k) = [u_{1,2}^{2(m)}(k), \dots, u_{i,l}^{j(m)}(k), \dots, u_{N,N-1}^{N-1(m)}(k)]^T$$
 –

вектор маршрутных переменных в момент времени  $t_k$  размерности  $N(N-1)^2$ ;  $B^{(m)}(k)$  – матрица пропускных способностей трактов передачи данных МС ТКС у момент времени  $t_k$  размерности  $N(N-1) \times N(N-1)^2$ , элементы которой формируются из величин  $b_{i,j}^{(m)}(k)$  выражения (1);

$B^{(k)}(k)$  – матрица объемов абонентской нагрузки, которая поступает на узлы магистрального сегмента ТКС в момент времени  $t_k$  размерности

$N(N-1) \times MN^2$ , элементы которой отвечают величинам  $b_{p,i}^{j(k)}(k)$  согласно выражению (1);

$$U^{(k)}(k) = [u_{1,1}^{1(k)}(k), \dots, u_{i,l}^{j(k)}(k), \dots, u_{M,N}^{N(k)}(k)]^T$$
 – вектор

коммутационных переменных в момент времени  $t_k$  размерности  $MN^2$ ;  $[\cdot]^T$  – знак транспонирования.

Динамика состояния ТКС согласно выражению (5) может быть описана более компактно в форме линейного векторно-матричного уравнения

$$X(k+1) = X(k) + B(k)U(k), \quad (8)$$

где  $B = [B^{(m)} B^{(k)}]$ ;  $U = \begin{bmatrix} U^{(m)} \\ U^{(k)} \end{bmatrix}$ .

Выбор маршрутных и коммутационных переменных в общем случае может быть произведен множеством способом. В этой связи расчет

$u_{i,l}^{j(m)}(k)$  и  $u_{p,i}^{j(k)}(k)$  обычно происходит в ходе постановки и решения соответствующей оптимизационной задачи. В качестве критерия оптимальности решения задач сетевого уровня необходимо выбрать некоторое условие, связанное с минимизацией (максимизацией) некоторого целевого функционала потерь (качества). Ранее, при решении задач маршрутизации и управления доступом [5] в качестве критерия выступал минимум квадратичного функционала вида

$$J = \sum_{k=0}^{v-1} [X^T(k)G_x X(k) + U^T(k)G_u U(k)], \quad (9)$$

где  $G_x$  – диагональная положительно определенная весовая матрица, обусловленная приоритетностью

очереди на узлах МС ТКС;  $G_u = \begin{bmatrix} G_u^{(m)} & 0 \\ 0 & G_u^{(k)} \end{bmatrix}$  –

блок-диагональная положительно определенная весовая матрица, в которой компоненты матрицы  $G_u^{(m)}$  определяются важностью трактов передачи в

ТКС, а компоненты матрицы  $G_u^{(k)}$  характеризуют относительную стоимость доступа к узлам МС;  $v$  – количество интервалов  $\Delta t$  перерасчета маршрутных и коммутационных переменных.

Однако, в случае использования критерия (9) совместно с ограничением (6) возникает парадоксальная ситуация, когда решением оптимизационной задачи являются нулевые значения векторов  $U^{(m)}$  и  $U^{(k)}$ , что на практике отвечает отказу сети выполнять свои функции. Таким образом, замена ограничений (5) на ограничения (6) подразумевает пересмотр критерия оптимизации, в соответствии с которым осуществляется расчет маршрутных и коммутационных переменных.

Более адекватно оценить качество решения задач сетевого уровня ЭМВОС можно с помощью критерия, определяющего минимум функционалу

$$J = \sum_{k=0}^{v-1} [X^T(k)G_x X(k) + U^T(k)G_u U(k) + H^T(k)G_h H(k)], \quad (10)$$

где  $H(k) = [h_1^1, \dots, h_p^j, \dots, h_M^N]^T$  – вектор ограниченной нагрузки, координаты которого

$$h_p^j = 1 - \sum_{i=1}^N u_{p,i}^{j(\kappa)}(k); \quad G_h - \text{диагональная положи-}$$

тельно определенная весовая матрица, компоненты которой определяют стоимость отказа (ограничения) в обслуживании сетью с различных направлений доступа.

Функционал (10) характеризует суммарные затраты, связанные с загрузкой буферных устройств узлов, пропускных способностей трактов передачи ТКС, а также стоимость отказа в доступе к МС ТКС со стороны АС на протяжении цикла оптимизации  $W = v\Delta t$ , и функционально связанный с объемом своевременно доставленных абонентских данных.

### Выводы

Предложенная математическая модель ТКС, относящаяся к классу динамических, обеспечивает адекватную формализацию согласованного решения задач сетевого уровня ЭМВОС. При этом, выполнение условий (1) гарантирует корректность решения маршрутных задач в ТКС, выполнение условий (2) и (3) способствует ограничению внутрисетевого трафика, а выполнение условий (4) и (6) нацеливает на решение задачи ограничения внешнего трафика, т.е. нагрузки, поступающей от АС ТКС.

В рамках предлагаемой модели расчет маршрутных и коммутационных переменных должен производиться путем минимизации стоимостного функционала (10) с учетом динамических ограничений (1), (7) или (8), а также ограничений на переменные состояния (2), маршрутные (3) и коммутационные (4), (6) переменные. Сформулированная оптимизационная задача относится к классу вариационных задач векторной оптимизации [6], которая

ввиду наличия ограничений (3) и (6) аналитического решения не имеет, требует комбинированного использования необходимых (достаточных) условий оптимальности и численных методов расчета [7].

### Литература

1. Семерич Ю. Автоматизация системы управления: реальность та перспектива // Військо України. №1-2, 2003р. – С.9-11.
2. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2002. – 672с.
3. Арипов М.Н. Контроль и управление в сетях передачи данных с коммутацией пакетов. – Ташкент: Фан, 1988. – 344с.
4. Segall A. The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications, 1975. Vol. 25. №1. – P. 85-95.
5. Лемешко А.В., Беленков А.Г. Динамическая модель комплексного решения задач маршрутизации и абонентского доступа в территориально-распределенных телекоммуникационных сетях // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сб. науч. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”. – Вып. 18. - Харьков, НАКУ, 2003. – С. 134-139.
6. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. - М.: Машиностроение, 1986. - 494 с.
7. Брайсон А., Хо Ю-ши Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

*Поступила в редакцию 25.07.03*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор Поповский В.В., Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, м. Харьков