

## МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

О.Ю. ЕВСЕЕВА

В работе предлагается метод динамического управления разнородными ресурсами территориально-распределенной иерархической телекоммуникационной сети, базирующийся на использовании декомпозиционного принципа последовательной координации и идей адаптивного управления.

The method of dynamic control of resources in a geographically-distributed hierarchical telecommunication network based on the decomposition principle of sequential coordination and ideas of adaptive control is offered.

### ВВЕДЕНИЕ

Условием эффективного функционирования мультисервисной телекоммуникационной сети (ТКС) является наличие подсистемы управления разнородными сетевыми ресурсами — канальными, буферными, информационными. Целью подобной подсистемы является обеспечение заданных значений выбранных для того или иного трафика показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) с минимизацией выделяемого для этого объема сетевого ресурса. Основными требованиями, предъявляемыми к системе управления сетевыми ресурсами, являются:

- высокое качество (оптимальность) принимаемых решений, основанное на реализации принципов динамического управления с отслеживанием текущего состояния сети и адаптацией к его изменению;
- согласованность в управлении разнородными сетевыми ресурсами с их динамической балансировкой;
- обеспечение высокой (приемлемой) масштабируемости решений с целью их реализации в территориально-распределенных ТКС;
- высокая оперативность в принятии решения и реагировании на изменения состояния ТКС;
- низкая загруженность сетевых ресурсов со стороны самой системы управления.

Кроме того, реализация перечисленных требований значительно усложняется за счет наличия априорной неопределенности по отношению к параметрам сети и/или внешним воздействиям. Указанные особенности в ходе разработки метода управления сетевыми ресурсами обуславливают, *во-первых*, использование динамических моделей ТКС как объекта управления, *во-вторых*, реализацию адаптивного подхода и соответственно результатов теории адаптивного управления, *в-третьих*, применение декомпозиционных принципов к решению исходной задачи управления с целью повышения масштабируемости получаемых решений. В дальнейшем под масштабируемостью будет пониматься свойство сети сохранять на за-

данном уровне показатели своей эффективности (производительность, задержки, джиттер, потери и т.д.) в условиях роста размерности ТКС (количества узлов и трактов передачи) и числа обслуживаемых трафиков.

### 1. СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ТКС

Наличие противоречивых по своему содержанию требований, связанных, с одной стороны, с качеством принимаемых решений, а с другой, с достигаемой при этом масштабируемостью, обуславливает целесообразность реализации иерархического принципа построения системы управления в территориально-распределенных ТКС. Данный принцип предполагает иерархическое построение самой сети с выделением относительно самостоятельных подсетей. Будем считать декомпозицию ТКС на подсети корректной, если:

1. Объем данных, циркулирующих внутри подсетей, значительно превышает объем трафика, предназначенного адресатам других подсетей.
2. Связность узлов внутри подсети превышает связность сетевых узлов — маршрутизаторов между подсетями.

Данные требования сформулированы из опыта практической эксплуатации территориально-распределенных (объединенных) сетей и позволяют говорить об относительной самостоятельности подсетей как структурных единиц ТКС.

Используя граф  $G(V, E)$  для математического описания структурных свойств сети, введем составную нумерацию ее вершин  $V$  по аналогии с адресацией в сетях ATM и OSI/ISO и условимся, что граница между подсетями проходит через тракты передачи (как в протоколе маршрутизации IS-IS). Тогда номер вершины графа  $G(V, E)$ , моделирующего иерархическую ТКС, имеет следующий формат

$$N_{\text{подсети}} \cdot N_{\text{узла}}$$

где  $N_{\text{подсети}}$  — номер подсети, уникальный в рамках сети в целом,  $N_{\text{узла}}$  — номер узла, уникальный в пределах подсети (рис. 1). В соответствии с введенными обозначениями для каждой  $q$ -й подсети

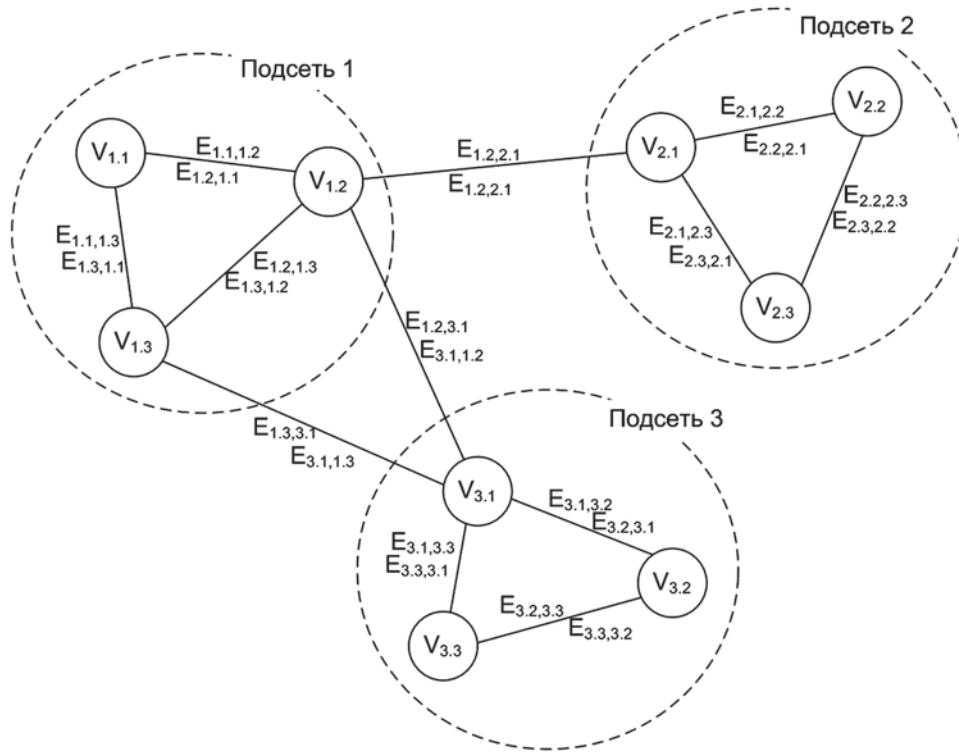


Рис. 1. Граф  $G(V, E)$

( $q = \overline{1, Q}$ ) можно указать множество ее узлов  $\{V_{q,i}\}$ ,  $i = \overline{1, N_q}$ , множество внутренних трактов передачи  $\{E_{q,i,q,j}\}$ ,  $i, j = \overline{1, N_q}$ ,  $i \neq j$  и внешних трактов передачи  $\{E_{q,i,g,j}\}$ ,  $i = \overline{1, N_q}$ ,  $g = \overline{1, Q}$ ,  $q \neq g$ ,  $j = \overline{1, N_g}$ , где  $Q$  – общее количество подсетей;  $N_q$  – количество узлов в  $q$ -й подсети.

Построение системы управления в соответствии с иерархическим принципом требует введения центров управления различных уровней. Ограничиваясь для наглядности двумя уровнями, введем центры управления подсетями (ЦУПС), осуществляющие управление ресурсами (внутренними и внешними) одной подсети (нижний уровень управления, НУ) и единый для всей сети центр управления (ЦУС), обеспечивающий согласованность межсетевое взаимодействия (верхний уровень, ВУ). Физически функции ЦУПС могут быть возложены на любой узел данной подсети, а функции ЦУС – на любой узел сети, обладающий достаточной вычислительной мощностью и имеющий соединения с центрами управления нижнего уровня.

Иерархический подход предполагает, что топологическая информация, необходимая для принятия решения, доступна на каждом уровне управления с разной степенью детализации (по аналогии с протоколами иерархической маршрутизации PNNI, IS-IS, OSPF). Тогда топологическая информация, доступная, достаточная и необходимая для принятия решения на ЦУС, может быть представлена в виде графа подсетей  $G^{BY}(V^{BY}, E^{BY})$  (рис. 2), где множество  $V^{BY} = \{V_q\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$  моделирует множество подсетей. Тракты

передачи  $E^{BY} = \{E_{q,g}\}$ ,  $q, g = \overline{1, Q}$ ,  $q \neq g$ , представляют собой агрегированные межсетевые тракты, которые образованы совокупностью трактов между  $q$ -й и  $g$ -й подсетями  $\{E_{q,g}\} = \bigcup_{i,j} \{E_{q,i,g,j}\}$ ,  $i = \overline{1, N_q}$ ,  $j = \overline{1, N_g}$ .

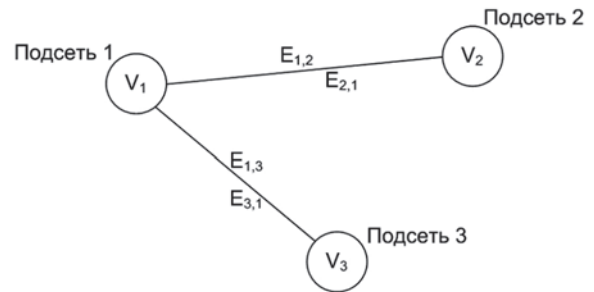


Рис. 2. Граф подсетей  $G^{BY}(V^{BY}, E^{BY})$

Пропускная способность агрегированного тракта  $E_{q,g}$  представляет собой сумму пропускных способностей образующих его физических трактов  $E_{q,i,g,j}$ :

$$C_{q,g} = \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{i=1}^{N_q} C_{q,i,g,j}. \quad (1)$$

Исходя из постановки задачи управления на уровне подсетей, топологическая информация на уровне  $q$ -го ЦУПС может быть представлена в виде графа  $G_q^{HY}(V_q^{HY}, E_q^{HY})$ , где множество  $V_q^{HY}$  объединяет в себе как внутренние (физические) узлы  $q$ -й подсети  $\{V_{q,i}\}$ ,  $i = \overline{1, N_q}$ , так и вершины, моделирующие целые подсети,  $\{V_g\}$ ,  $g = \overline{1, Q}$ ,  $q \neq g$  (абстрактные узлы), то есть  $V_q^{HY} = \bigcup_i \{V_{q,i}\} \cup \{V_g\}$ ,  $i = \overline{1, N_q}$ ,  $g = \overline{1, Q}$ ,  $q \neq g$ . На рис. 3 в качестве при-

мера приведен граф топологической информации, доступной для ЦУПС первой подсети ТКС (рис. 1).

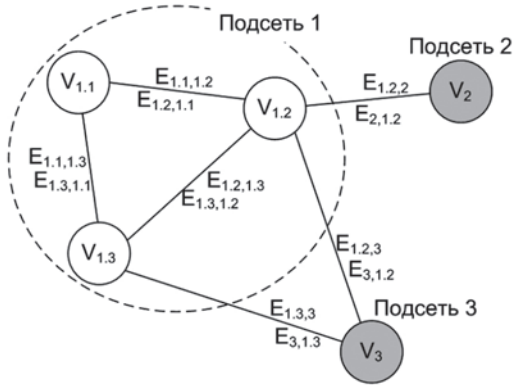


Рис. 3. Граф топологической информации нижнего уровня первой подсети  $G_1^{HY} (V_1^{HY}, E_1^{HY})$

Множество ветвей графа топологической информации на нижнем уровне  $E_q^{HY}$  образовано тремя подмножествами:

– подмножеством внутренних трактов передачи  $q$ -й подсети  $\{E_{q,i,q,j}\}, i, j = \overline{1, N_q}, i \neq j$ ;

– подмножеством внешних трактов передачи  $q$ -й подсети, соединяющих узлы данной подсети с другими подсетями  $\{E_{q,i,g}\} = \bigcup_j \{E_{q,i,g,j}\},$

$\{E_{g,q,i}\} = \bigcup_j \{E_{g,j,q,i}\}, i = \overline{1, N_q}, g = \overline{1, Q}, q \neq g,$

$j = \overline{1, N_g}$ , пропускные способности которых агрегированы  $C_{q,i,g} = \sum_{j=1}^{N_g} C_{q,i,g,j}, C_{g,q,i} = \sum_{j=1}^{N_g} C_{g,j,q,i}$ ;

– подмножеством агрегированных трактов передачи между всеми остальными подсетями  $\{E_{g,p}\} = \bigcup_{i,j} \{E_{g,i,p,j}\}, g, p = \overline{1, Q}, p, g \neq q, i = \overline{1, N_g},$

$j = \overline{1, N_p}$ , пропускные способности которых агрегированы  $C_{g,p} = \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_g} C_{g,i,p,j}$ .

Таким образом, выступающая в качестве исходных данных для формирования вектора управления топологическая информация на разных уровнях управления обладает разной степенью детализации: наиболее обобщенная для ЦУС (верхний уровень) и с детализацией внутренней топологии для ЦУПС (нижний уровень иерархического управления).

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМИ РЕСУРСАМИ

Как показывает анализ, одним из наиболее результативных подходов к функциональному описанию ТКС является подход, основанный на представлении ее динамики в пространстве состояний [1]. Математическая модель ТКС и системы адаптивного управления нею при таком подходе описывается векторами переменных со-

стояния  $\vec{x}(k)$ , управления  $\vec{u}(k)$ , наблюдения  $\vec{b}(k)$ , а также неизвестных  $\vec{y}(k)$  и подстраиваемых  $\vec{\tau}(k)$  параметров. Эти векторы связаны между собой уравнениями состояния, наблюдения, управления и адаптации соответственно:

$$\vec{x}(k+1) = F(\vec{x}(k), \vec{u}(k), \vec{y}(k)),$$

$$\vec{b}(k) = G(\vec{x}(k), \vec{\varphi}(k)),$$

$$\vec{u}(t) = U(\vec{x}(t), \vec{\tau}(t)),$$

$$\vec{\tau}(k+1) = \ddot{E}(\vec{\tau}(k), \vec{b}(k), \vec{b}(k+1)).$$

Физический смысл, вкладываемый в каждую из переменных, обуславливает вид этих уравнений, а в дальнейшем влияет и на характер решения задачи управления. Исходя из требования, связанного с согласованностью в управлении различными сетевыми ресурсами (канальными буферными, информационными), выберем в качестве переменных состояния, образующих вектор  $\vec{x}(k)$ , величины  $x_{q,i,g,j}(k)$ , которые отражают объем данных, хранящихся в момент времени  $t_k$  на узле  $(q,i)$  и предназначенных узлу  $(g,j)$ . В роли переменных управления  $u_{q,i,p,l}^{g,j}(k)$  (элементы вектора  $\vec{u}(k)$ ) выберем доли пропускных способностей трактов  $(q,i,p,l)$ , которые выделяются в момент времени  $t_k$  для доставки пакетов трафика, предназначенного узлу  $(g,j)$ . В такой трактовке переменные состояния указывают на степень текущего использования буферного ресурса, а переменные управления отражают результат распределения информационных потоков (информационный ресурс) и степень использования канального ресурса.

Учитывая, что основным фактором, вызывающим стохастические изменения в состоянии современных ТКС, являются не столько отказы оборудования, сколько колебания трафика, то целесообразно допустить наличие неопределенности именно по отношению к объемам поступающей нагрузки и разработать метод адаптивного управления с учетом этого. Тогда в роли неизвестных параметров будут выступать объемы абонентской нагрузки  $y_{q,i,g,j}^{ab}(k)$ , поступающей в момент времени  $t_k$  на узел  $(q,i)$  и предназначенной для передачи узлу  $(g,j)$ .

В рамках введенных переменных и с учетом их физического смысла уравнение состояния в индексной записи имеет вид [1]

$$x_{q,i,g,j}(k+1) = x_{q,i,g,j}(k) - \sum_{p=1}^Q \left( \sum_{\substack{l=1, \\ q,i \neq p,l}}^{N_p} b_{q,i,p,l}(k) u_{q,i,p,l}^{g,j}(k) \right) + \sum_{r=1}^Q \left( \sum_{\substack{m=1, \\ r,m \neq q,i,g,j}}^{N_p} b_{r,m,q,i}(k) u_{r,m,q,i}^{g,j}(k) \right) + y_{q,i,g,j}^{ab}(k), i = \overline{1, N_q},$$

$$i = \overline{1, N_g}, q, g = \overline{1, Q}, q,i \neq g,j, \quad (2)$$

а ограничения на отсутствие перегрузки буферных и канальных ресурсов можно записать в форме

$$0 \leq x_{q,i,g,j}(k) \leq x_{q,i,g,j}^{\max}, \quad (3)$$

$$0 \leq u_{q,i,p,l}^{g,j}(k) \leq 1, \quad (4)$$

$$\sum_{g=1}^Q \left( \sum_{j=1}^{N_g} u_{q,i,p,l}^{g,j}(k) \right) \leq 1, \quad (5)$$

где  $b_{q,i,p,l}(k) = C_{q,i,p,l}(k)\Delta t$ ;  $x_{q,i,g,j}^{\max}$  – максимально допустимый размер очереди в узле ( $q,i$ ) для трафика с адресатом ( $g,j$ ).

Динамический характер модели (2)-(5) позволяет реализовать принципы динамического управления с отслеживанием текущего состояния сети и адаптацией к его изменению, что является первым и одним из важнейших требований к подобному роду системам. В зависимости от содержания выдвигаемых требований, модель (2)-(5) может быть дополнена ограничениями, связанными с динамической балансировкой сетевых ресурсов [2] и обеспечения гарантий QoS [3].

Система уравнений (2) может быть представлена в матричной форме

$$\vec{x}(k+1) = \vec{x}(k) + B(k)\vec{u}(k) + \vec{y}^{ab}(k), \quad (6)$$

где  $B(k)$  – матрица, отображающая структуру сети и объемы доступных канальных ресурсов, элементами которой являются величины  $\pm b_{q,i,p,l}(k)$ ;  $\vec{y}^{ab}(k)$  – вектор неизвестных параметров, объединяющий переменные  $y_{q,i,g,j}^{ab}$ .

Уравнение наблюдения может быть формализовано в общепринятом виде [1]

$$\vec{\sigma}(k) = H(k)\vec{x}(k) + \vec{\phi}(k), \quad (7)$$

где  $H(k)$  – масштабирующая матрица, определяющая, насколько усилены (при  $H > 1$ ) или ослаблены (при  $H < 1$ ) измеряемые переменные состояния;  $\vec{\phi}(k)$  – шумы измерений (центрированный нормальный случайный процесс).

Разработка метода управления в рамках представленной выше модели нацелена на поиск закона формирования вектора  $\vec{u}(k)$  как функции результатов текущих измерений  $\sigma_{q,i,g,j}(k)$ , справедливого в условиях неопределенностей. В качестве критерия его формирования выберем минимум расходов канальных и буферных ресурсов в процессе доставки пакетов трафика адресатам, который имеет вид распространенного в теории оптимального управления стоимостного квадратичного функционала

$$P(k) = \vec{x}^T(k)Q_X\vec{x}(k) + \vec{u}^T(k)Q_U\vec{u}(k), \quad (8)$$

где  $Q_X$ ,  $Q_U$  – диагональные соответственно неотрицательно и положительно определенные весовые матрицы, определяемые приоритетностью очередей на узлах и важностью трафков передачи ТКС.

Тогда исходная задача управления сетевыми ресурсами в целом формализуется в виде задачи

оптимального адаптивного управления следующим образом [4, 5]

$$\min_{\vec{u}} \left( \lim_{k \rightarrow \infty} P(k) \right). \quad (9)$$

В рамках теории адаптивного управления решение задачи (9) предполагает выполнение следующих основных действий, связанных с решением:

- 1) задачи оценивания текущего состояния сети по результатам измерений;
- 2) задачи оптимального управления в условиях наличия оценок состояния сети;
- 3) задачи адаптации, заключающейся в выборе подстраиваемых параметров сети.

Решение первой из перечисленных задач не представляет трудностей. Наличие уравнений состояния (6) и наблюдения (7) с известными параметрами  $B(k)$ ,  $H(k)$  и статистическими характеристиками шумов  $\vec{\phi}(k)$  позволяет, например, при помощи процедур Калмана-Бьюси [1], получить на основе результатов измерений  $\sigma_{q,i,g,j}(k+1)$  эффективные оценки текущего состояния ТКС  $\hat{x}_{q,i,g,j}(k+1)$ .

При решении задачи оптимального управления ресурсами ТКС в рамках модели (2-6) предполагаются известными структура сети (матрица  $B(k)$ ) и входная нагрузка (вектор  $\vec{y}^{ab}(k)$ ). Искомым является вектор управления  $\vec{u}(k)$ , который обеспечивает при наличии дополнительной информации об объемах входной нагрузки не только на  $k$ -м интервале, а и на последующих  $(k+1)$ ,  $(k+2)$ , ...,  $(k+a)$  интервалах минимум целевой функции

$$J = \sum_{k=1}^a P(k), \quad (10)$$

где  $a$  – интервал прогнозирования. Наличие свойства прогнозирования позволит реализовать превентивное (заблаговременное) предотвращение перегрузок, способствуя тем самым повышению эффективности функционирования сети в целом.

В целом задача минимизации (10) при наличии динамических и интегральных ограничений (3)-(6) является вариационной и для ее решения могут быть применены численные методы расчета.

Третий этап разработки метода оптимального адаптивного управления, заключающийся в решении задачи адаптации, связан с выбором подстраиваемых параметров, которые должны заменить неизвестные параметры в задаче оптимального управления. Взяв за основу идентификационный подход и предполагая, что элементы матрицы  $B(k)$  известны, задача адаптации будет заключаться в идентификации неизвестных параметров  $\vec{y}^{ab}(k)$ , которые и будут выступать в качестве подстраиваемых  $\vec{\tau}(k) = \vec{y}^{ab}(k)$ . В работе [6] рассматривается адаптивный подход к управлению сетевыми ресурсами, связанный с идентификацией вектора  $\vec{y}^{ab}(k)$ , где для определения подстраиваемых параметров используется выражение

$$\tau_{q,i,g,j}(k+1) = \tau_{q,i,g,j}(k) + \gamma(k)[\hat{x}_{q,i,g,j}(k+1) - x_{q,i,g,j}(k+1)], \quad (11)$$

где  $\gamma(k)$  – шаг алгоритма;  $\hat{x}_{q,i,g,j}(k+1)$  – оценка размера очереди по результатам измерений;  $x_{q,i,g,j}(k+1)$  – размер очереди, ожидаемый по результатам расчетов.

В выражение (11) в общем случае может быть введен вектор прогнозируемых объемов нагрузки на  $\vec{y}^{np}(k+1)$ , что, как ожидается, повысит эффективность процедуры адаптации.

Таким образом, используя предложенный в [6] подход к решению задачи адаптации и располагая процедурами оценивания состояния [1], исходная задача управления сетевыми ресурсами в условиях стохастичности и неопределенностей сводится к выбору удовлетворяющего требованиям масштабируемости алгоритма минимизации (10) при наличии ограничений (3)-(6) и в предположении известности элементов матрицы  $B(k)$  и вектора  $\vec{y}^{ab}(k)$ .

### 3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ТКС

В связи с переходом к иерархическому построению ТКС и ее системы управления функциональная модель в пространстве состояний (2)-(5) требует модификации и адаптации к используемой на разных уровнях управления топологической информации (рис. 2, 3).

С целью получения уравнения состояния для сети на верхнем (агрегированном) уровне, описывающем динамику функционирования сети в целом как процесс взаимодействия подсетей, просуммируем скалярные уравнения состояния вида (2), обладающие разными индексами подсетей  $q$  и  $g$ ,  $q \neq g$ . Теперь в качестве переменной состояния (переменная состояния ВУ) выступает

$$x_{q,g}(k) = \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{i=1}^{N_q} x_{q,i,g,j}(k),$$

которая представляет собой объем данных, хранящихся в буферах всех узлов  $q$ -подсети и предназначенных для узлов  $g$ -й подсети.

В результате имеем систему уравнений для описания динамики информационного обмена между подсетями (динамика верхнего агрегированного уровня), которая в векторно-матричном виде выглядит как

$$\vec{x}^{BY}(k+1) = \vec{x}^{BY}(k) + B^{BY}(k)\vec{u}^{BY}(k) + \vec{y}^{BY}(k), \quad (12)$$

где  $\vec{x}^{BY}(k)$  – вектор переменных состояния ВУ размерности  $Q(Q-1)$ , объединяющий в себе  $x_{q,g}(k)$ , которые отражают обобщенную информацию о состоянии подсетей в целом;  $\vec{u}^{BY}(k)$  – вектор переменных управления ВУ размерности  $Q(Q-1)^2$ , объединяющий в себе  $u_{q,p}^g(k)$ ;  $B^{BY}(k)$  – матрица размерности  $Q(Q-1) \times Q(Q-1)^2$ , элементами которой являются величины  $\pm b_{q,p}(k) = \pm C_{q,p}(k)\Delta t$ ;  $\vec{y}^{BY}(k)$  – вектор суммарной нагрузки между под-

сетями размерности  $Q(Q-1)$ , элементами которого являются  $y_{q,g}(k) = \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{i=1}^{N_q} y_{q,i,g,j}^{ab}(k)$ .

Из исходной общей системы уравнений (2) может быть получена система уравнений для  $q$ -й подсети ( $q = \overline{1, Q}$ ), которые описывают динамику информационного обмена на нижнем уровне и в векторно-матричном виде выглядят как

$$\vec{x}_q^{HY}(k+1) = \vec{x}_q^{HY}(k) + B_q^{HY}(k)\vec{u}_q^{HY}(k) + \vec{y}_q^{HY}(k), \quad (13)$$

$$\text{где } \vec{x}_q^{HY}(k) = \begin{bmatrix} x_{q,i,q,j}(k) \\ \vdots \\ x_{q,i,g}(k) \\ \vdots \\ x_{d,q,j}(k) \\ \vdots \\ x_{d,p}(k) \end{bmatrix} \text{ – вектор состояния } q\text{-й}$$

подсети;  $B_q^{HY}(k)$  – матрица, отражающая доступную для данного уровня топологическую инфор-

$$\text{мацию; } \vec{y}_q^{HY}(k) = \begin{bmatrix} y_{q,i,q,j}^\Sigma(k) \\ \vdots \\ y_{q,i,g}^\Sigma(k) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \vec{y}_q^{ab}(k) + \vec{y}_q^{BH}(k)$$

– вектор суммарной нагрузки на узлы  $q$ -й подсети, объединяющий в себе собственно абонентскую нагрузку  $\vec{y}_q^{ab}(k)$  и внешнюю (входящую и транзитную)  $\vec{y}_q^{BH}(k)$ ,  $y_{q,i,q,j}^\Sigma(k) = y_{q,i,q,j}^{BH}(k) + y_{q,i,q,j}^{ab}(k)$ ;

$$y_{q,i,g}^\Sigma(k) = y_{q,i,g}^{BH}(k) + \sum_{j=1}^{N_g} y_{q,i,g,j}^{ab}(k);$$

$\vec{u}_q^{HY}(k)$  – вектор управления, причем

$$\vec{u}_q^{HY}(k) = \begin{bmatrix} \vdots \\ u_{q,m,q,i}^{q,j}(k) \\ \vdots \\ u_{q,i,p}^{q,j}(k) \\ \vdots \\ u_{d,p}^{q,j}(k) \\ \vdots \\ \text{-----} \\ \vdots \\ u_{q,i,q,l}^g(k) \\ \vdots \\ u_{q,i,p}^g(k) \\ \vdots \\ u_{d,p}^g(k) \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{cases} \text{внутренние тракты,} \\ \text{адресат в } q\text{-й подсети} \\ \text{внешние тракты,} \\ \text{адресат в } q\text{-й подсети} \\ \text{внешние межсетевые тракты,} \\ \text{адресат в } q\text{-й подсети} \\ \text{внутренние тракты,} \\ \text{адресат в } g\text{-й подсети} \\ \text{внешние тракты,} \\ \text{адресат в } g\text{-й подсети} \\ \text{внешние межсетевые тракты,} \\ \text{адресат в } g\text{-й подсети.} \end{cases}$$

Заметим, что, во-первых, в векторе состояния  $q$ -й подсети  $X_q^{HY}(k)$  присутствуют переменные, связанные с размерами очередей на физических узлах  $x_{q,i,q,j}(k)$  и  $x_{q,i,g}(k)$ , а так же абстрактные величины, имитирующие загрузку других подсетей  $x_{d,q,j}(k)$  и  $x_{d,p}(k)$ . Во-вторых, при рассмотрении динамики информационного обмена в  $q$ -й подсети на нижнем уровне предполагается, что источниками нагрузки могут быть только физические узлы – внутренние узлы данной подсети, что отражено в структуре вектора  $\vec{y}_q^{HY}(k)$ .

В результате с точки зрения функционального описания имеем двухуровневую организацию сети, в которой динамика на верхнем (агрегированном) уровне описывается уравнением (12), а на нижнем, связанным с отдельными подсетями, – совокупностью  $Q$  уравнений вида (13). Такое описание динамики состояния территориально-распределенной ТКС позволяет выделить два уровня в иерархии управления (рис. 4). Здесь задачи нижнего уровня, которые связаны с управлением ресурсами в рамках отдельных подсетей и базируются на функциональном описании уравнением (13) и использовании соответствующей топологической информации, возлагаются на ЦУПС. Задача верхнего уровня, возлагаемая на ЦУС, связана с агрегированным описанием ТКС в виде (12), базируется на использовании обобщенной топологической информации. В рамках иерархического построения системы управления (рис. 2) предполагается взаимодействие уровней с целью выработки единого взаимосогласованного решения.



Рис. 4. Двухуровневое представление задачи управления

#### 4. МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМИ РЕСУРСАМИ

Способ организации взаимодействия различных уровней в системе управления (рис. 4) должен одновременно удовлетворять двум противоречивым требованиям: к качеству получаемого решения и к оперативности его формирования. В рамках иерархических систем приемлемый компромисс между этими требованиями может быть достигнут при использовании принципа последовательной (секвенциональной) координации (рис. 5), реализующего идеи адаптивного управления [7-9]. Согласно этому принципу целью взаимодействия двух уровней является улучшение текущего значения целевой функции (функционала качества) путем последовательного (итерационного) приближения к оптимальному значению.

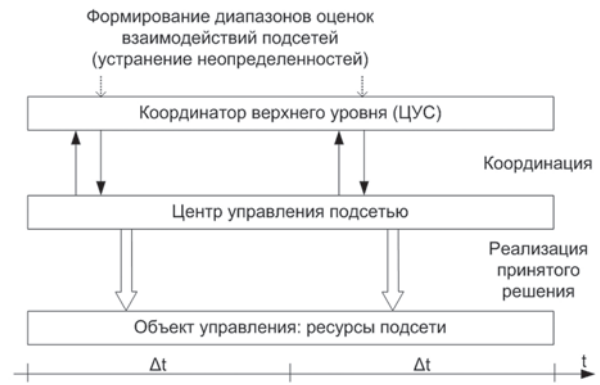


Рис. 5. Принцип последовательной координации

В рамках секвенционального подхода, в отличие от других декомпозиционных принципов, на протяжении периода координации  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  координатор верхнего уровня (ЦУС) только один раз координирует решения НУ, полученные по подсетям. После этого ЦУПС каждой подсети в дальнейшем самостоятельно, без вмешательства координатора ВУ, решают свои локальные задачи управления собственными ресурсами и непосредственно реализуют полученный вектор управления.

В свою очередь, решаемая каждым ЦУПС задача НУ является задачей принятия решения в условиях неопределенности относительно действий других ЦУПС, а именно объемов трафика, поступающего из других подсетей. В результате получаем, что задачи управления ресурсами в рамках отдельных подсетей могут быть рассмотрены как задачи адаптивного управления. Задача устранения (по возможности) указанных неопределенностей в рамках принципа последовательной координации возлагается на координатор верхнего уровня (ЦУС) и решается им путем формирования диапазонов оценок вектора взаимодействия подсистем, а в случае ТКС – подсетей. Координирующий сигнал, который поступает от верхнего уровня, и содержит именно эти оценки (рис. 5).

Рассматривая задачу управления ресурсами  $q$ -й подсети как задачу адаптивного управления, выделим переменные  $\vec{y}_q^{BH}(k)$  в качестве неизвестных параметров, подлежащих подстройке, реализуя тем самым идентификационный подход. Тогда наряду с задачей идентификации величины абонентской нагрузки  $\vec{\tau}(k) = \vec{y}^{ab}(k)$  (11) выделяется еще одна задача адаптации, заключающаяся в формировании вектора уже других подстраиваемых параметров  $\tau_q^{HY}(k) = \vec{y}_q^{BH*}(k)$ , – задача адаптации второго уровня. Ее решение должно предшествовать решению непосредственно задачи управления, связанной в условиях декомпозиции с поиском наилучшего распределения ресурсов  $\vec{u}_q^{HY}(k)$ .

Таким образом, применение идей адаптации к задаче управления сетевыми ресурсами в совокупности с иерархическим принципом организа-

ции как самой сети, так и системы ее управления приводит к следующему решению (рис. 6). Исходная задача рассматривается как совокупность двух задач адаптации (первого и второго уровней) и собственно задачи управления. Задача адаптации первого уровня призвана сформировать вектор абонентской нагрузки  $\tau(k) = \bar{y}^{ab*}(k)$ , поступающей на узлы сети, где она и решается. Задача адаптации второго уровня, возлагаемая на координатор верхнего уровня – ЦУС, призвана устранить неопределенность по отношению к объемам внешней нагрузки  $\tau_q^{HY}(k) = \bar{y}_q^{BH*}(k)$ , поступающей в  $q$ -ю подсеть от других подсетей. Результаты решения этих задач в совокупности с результатами измерений выступают в качестве исходных данных непосредственно для поиска наилучшего в данных условиях вектора управления  $\bar{u}_q^{HY}(k)$ , реализуемого на ЦУПС.

#### 4.1. Задача адаптации

В рамках функциональной модели иерархической ТКС внешний и транзитный трафик формализуется на нижнем уровне как

$$y_{q,i,q,j}^{BH}(k) = \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq q}}^Q b_{r,q,i}(k) u_{r,q,i}^{q,j}(k)$$

и

$$y_{q,i,g}^{BH}(k) = \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq q,g}}^Q b_{r,q,i}(k) u_{r,q,i}^g(k).$$

При известных  $b_{r,q,i}(k)$ , отражающих структурные особенности сети, задача определения внешнего входящего и транзитного трафика – задача адаптации второго уровня – сводится к поиску величин  $u_{r,q,i}^g(k)$ ,  $g = \bar{1}, Q$ , являющихся функциями элементов вектора управления на межсетевом уровне.

Сформулируем задачу определения вектора управления на межсетевом уровне как оптимизационную задачу по минимизации стоимостного целевого функционала

$$J^{BY} = \sum_{k=1}^a \left[ \left( \bar{x}^{BY}(k) \right)^T Q_X^{BY} \bar{x}^{BY}(k) + \left( \bar{u}^{BY}(k) \right)^T Q_U^{BY} \bar{u}^{BY}(k) \right] \rightarrow \min, \quad (14)$$

где  $Q_X^{BY}$ ,  $Q_U^{BY}$  – диагональные соответственно неотрицательно и положительно определенные весовые матрицы.

В качестве ограничений в данной оптимизационной задаче выступают (12) и выражения, аналогичные (3)-(5), записанные для переменных верхнего уровня.

После определения вектора  $\bar{u}^{BY}(k)$ , элементами которого являются  $u_{r,q}^g(k)$ , возникает следующая задача поиска величин  $u_{r,q,i}^g(k)$  и  $u_{r,q,i}^{q,j}(k)$ , которые позволят сформировать вектор внешней нагрузки и тем самым получить окончательное решение задачи адаптации. В случае транзитного трафика ( $g \neq q$ ) примем  $u_{r,q,i}^g(k) = u_{r,q}^g(k)$ . В случае внешнего входящего трафика (предназначенного узлам  $q$ -й подсети) из решения оптимизационной задачи (14) существует возможность выделить только суммарный объем внешнего входящего трафика на основе переменных управления  $u_{r,q}^g(k)$ . С целью детализации объемов трафика, адресованных каждому узлу  $q$ -й подсети в отдельности потребуем формирование на верхнем уровне дополнительного вектора пропорций  $p_q$ , отражающего в суммарном внешнем входящем трафике, адресованном всей  $q$ -й подсети, долю трафика, адресованного узлу  $q.i$ .

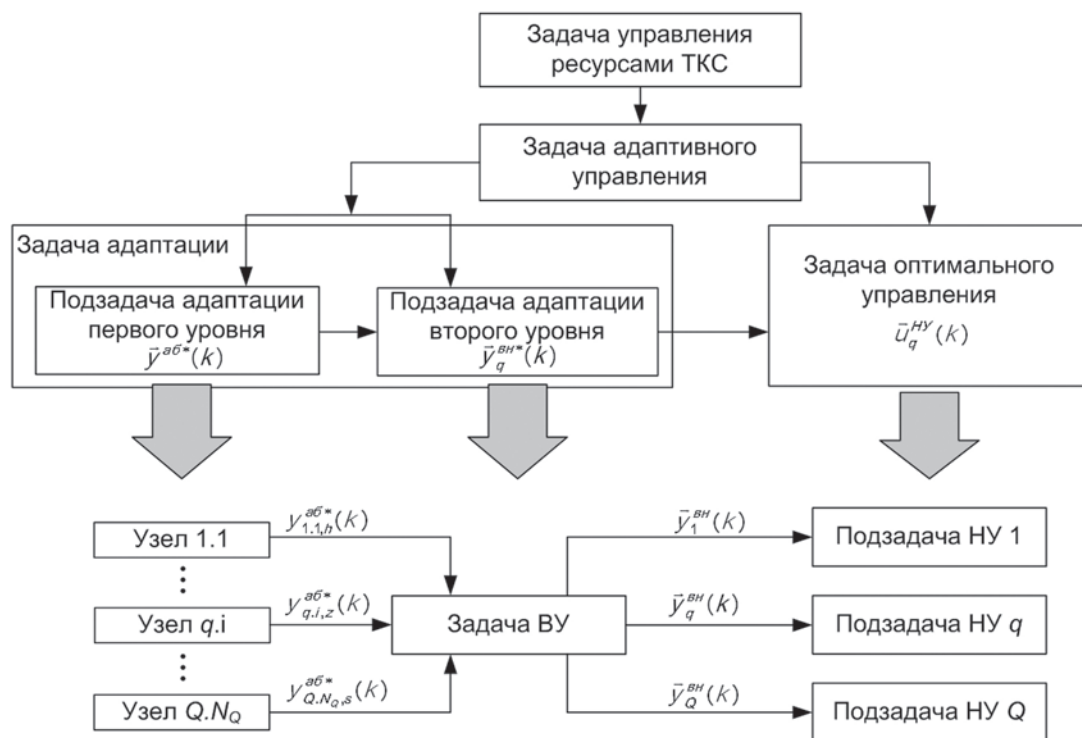


Рис. 6. Декомпозиционное представление задачи управления ресурсами ТКС

Его элементы можно описать как  $p_{q,q,i}$ . Тогда имеем  $y_{q,i,q,j}^{BH*}(k) = b_{r,q,i}(k)u_{r,q}^q(k)p_{q,q,j}(k)$ .

**4.2. Задача оптимального управления ресурсами  $q$ -й подсети**

Искомый вектор управления  $\vec{u}_q^{HY}(k)$  можно записать в виде  $\vec{u}_q(k) = [\dots u_{q,i,z}^h(k) \dots]^T$ , где  $h, z$  могут указывать как на узел  $q$ -й подсети, так и на узлы других подсетей. В случае исходящих трактов примем  $u_{q,i,r,m}^g(k) = u_{q,i,r}^g(k)$ , где  $u_{q,i,r}^g(k)$  является элементом вектора  $\vec{u}_q^{HY}(k)$ . В случае внутренних трактов передачи соответствующие переменные управления  $u_{q,i,q,l}^g(k)$  уже являются элементами вектора  $\vec{u}_q^{HY}(k)$ .

Тогда задача формирования вектора управления может быть сформулирована как оптимизационная, связанная с минимизацией по переменным управления стоимостного квадратичного функционала

$$J_q^{HY} = \sum_{k=1}^a \left[ (\vec{x}_q^{HY}(k))^T Q_{Xq}^{HY} \vec{x}_q^{HY}(k) + (\vec{u}_q^{HY}(k))^T Q_{Uq}^{HY} \vec{u}_q^{HY}(k) \right] \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $Q_{Xq}^{HY}, Q_{Uq}^{HY}$  – весовые матрицы.

В качестве ограничений в данной оптимизационной задаче выступают (13) и выражения, аналогичные (3)–(5), записанные для переменных нижнего уровня.

Так же, как (10), задача минимизации (15) представляет собой вариационную оптимизационную задачу и может быть решена при помощи численных методов.

**4.3. Порядок решения задачи управления сетевыми ресурсами**

В рамках разработанного метода предполагается следующий порядок решения задачи управления сетевыми ресурсами иерархической ТКС:

1. Каждый узел сети выполняет задачу мониторинга состояния своих канальных и буферных ресурсов, а также реализует измерения текущих размеров очередей, на основании чего формируется вектор результатов измерений  $\hat{x}_{q,i,g,j}(k)$ . Затем выполняется решение задачи адаптации первого уровня, по результатам решения которой формируется вектор ожидаемых объемов поступающей на узел абонентской нагрузки  $\vec{y}^{ab*}(k)$  (рис. 7).

2. ЦУПС  $q$ -й подсети отслеживает текущее состояние всей своей подсети, формализованное в виде вектора состояния  $\vec{x}_q^{HY}(0)$ , сформированного на основании результатов измерений

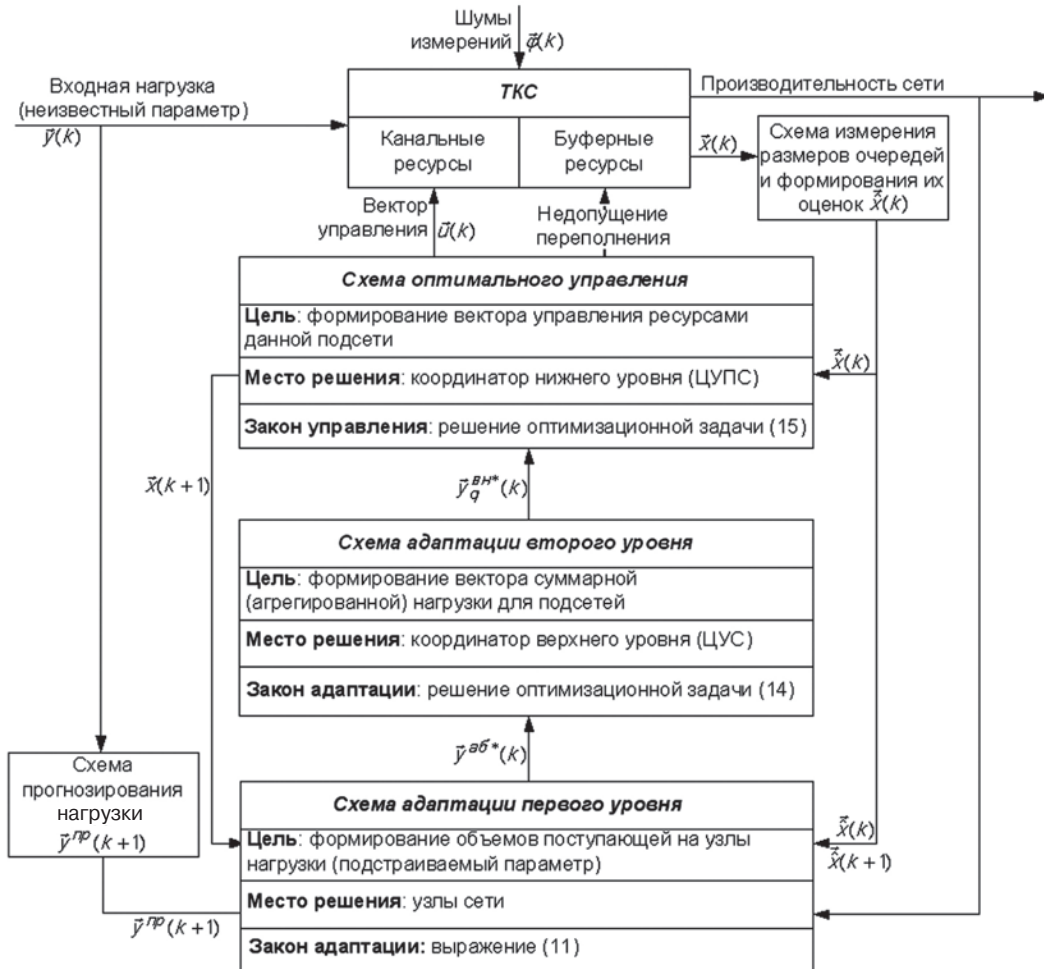


Рис. 7. Структура метода адаптивного управления сетевыми ресурсами иерархической ТКС



$\hat{x}_{q,i,g,j}(k)$ , и в виде вектора абонентской нагрузки  $\vec{y}^{аб*}(k)$ , полученного в результате решения задачи адаптации первого уровня. ЦУПС передает вышестоящему единому центру управления только внешнюю по отношению к  $q$ -й подсети информацию – топологическую и ожидаемый объем внешнего исходящего трафика  $y_{q,g}^*(k)$  с указанием его распределения в рамках  $g$ -й подсети по адресатам.

3. ЦУС на основе полученной информации формирует матрицу  $B^{BY}(k)$ , отражающую обобщенную топологию сети, и вектор  $\vec{y}^{BY*}(k)$ , отражающий уровень суммарной абонентской нагрузки на подсети. Затем решает задачу адаптации второго уровня, формализованную как оптимизационную (14). В ходе ее решения будет получен для каждой  $q$ -й подсети вектор внешней входящей и транзитной нагрузки  $\vec{\tau}_q^{HY}(k) = \vec{y}_q^{BH*}(k)$ , который передается центрам управления нижележащего уровня. Кроме этого, всем ЦУПС передается обобщенная топологическая информация о всей сети.

4. ЦУПС  $q$ -й подсети, обладая топологической информацией (детальной внутренней и обобщенной внешней), а также объемами абонентского трафика, полученными на узлах в ходе решения задачи адаптации первого уровня (п.1)  $\vec{y}^{аб*}(k)$  и объемами внешнего трафика  $\vec{y}_q^{BH*}(k)$ , полученными от ЦУС, решает задачу оптимального управления с целью формирования вектора  $\vec{u}_q(k)$  (15).

5. Полученный вектор управления  $\vec{u}_q(k)$  подлжит реализации.

При обнаружении изменений в объемах абонентской нагрузки  $\vec{y}^{аб*}(k)$ , адресованной внутренним адресатам, либо по истечении периода внутреннего перерасчета осуществляется переход к п. 4. При обнаружении значительных изменений во внешних нагрузках – переход к п. 2.

### 5. ПРИМЕР РАБОТЫ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМИ РЕСУРСАМИ

Рассмотрим работу предлагаемого метода управления сетевыми ресурсами на примере сети рис. 1, где пропускные способности трактов передачи принимали значения от 100 Мбит/с до 1 Гбит/с. Сосредоточим внимание на потерях качества управления, связанных с переходом к иерархическому представлению сети и решением задачи управления в два этапа: адаптации второго уровня и собственно управления, по сравнению с оптимальными схемами расчета.

Пусть, ожидаемая на  $k$ -м временном интервале абонентская нагрузка на сеть (по результатам решения задачи адаптации первого уровня) составляет  $y_{1,1,2,2}(k) = 10$  Мбит,  $y_{2,3,3,1}(k) = 10$  Мбит,  $y_{3,3,2,1}(k) = 10$  Мбит (здесь опущен верхний индекс, указывающий тип трафика – абонентский).

Результат решения задачи верхнего уровня представлен на рис. 8. Результаты решения задач управления в каждой из подсетей показаны на рис. 9-11. Результирующее распределение потоков в сети, получаемое при реализации рассчитанных на нижнем уровне переменных управления, имеет вид (рис. 12, а). На рис. 12,б приведено распределение этой же нагрузки по трактам передачи сети, полученное в результате централизованного оптимального решения задачи управления. Как показали результаты моделирования, отклонение в достигаемом значении целевого функционала для рассмотренного примера при использовании предлагаемого метода составило менее 1% от его оптимального значения.

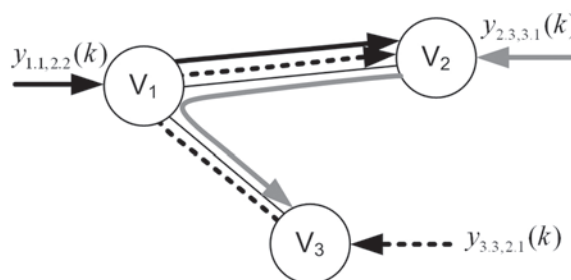


Рис. 8. Результат решения задачи верхнего уровня

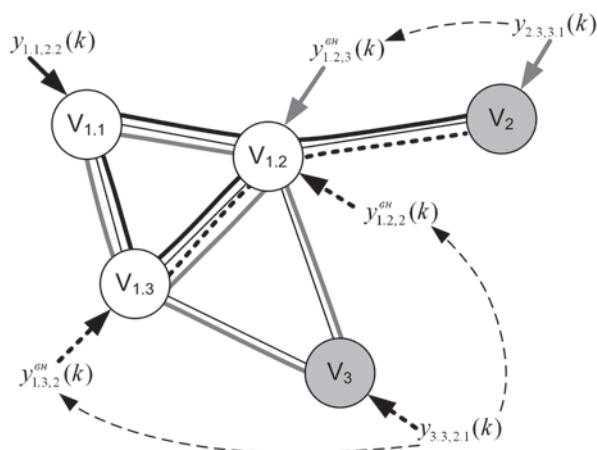


Рис. 9. Результаты решения задач управления в первой подсети

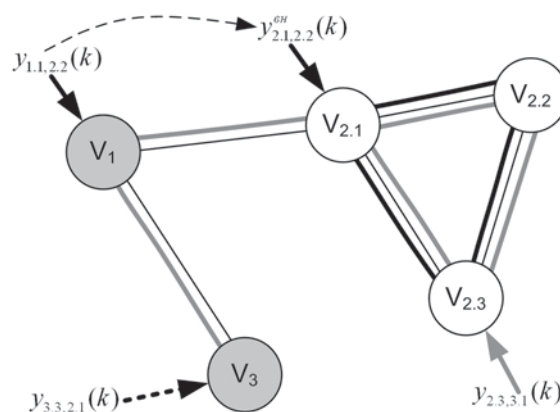


Рис. 10. Результаты решения задач управления во второй подсети

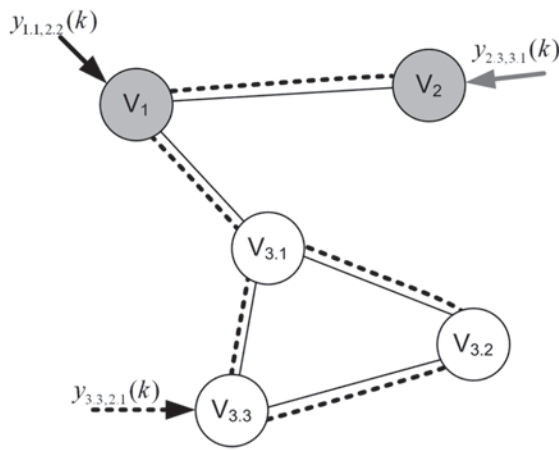
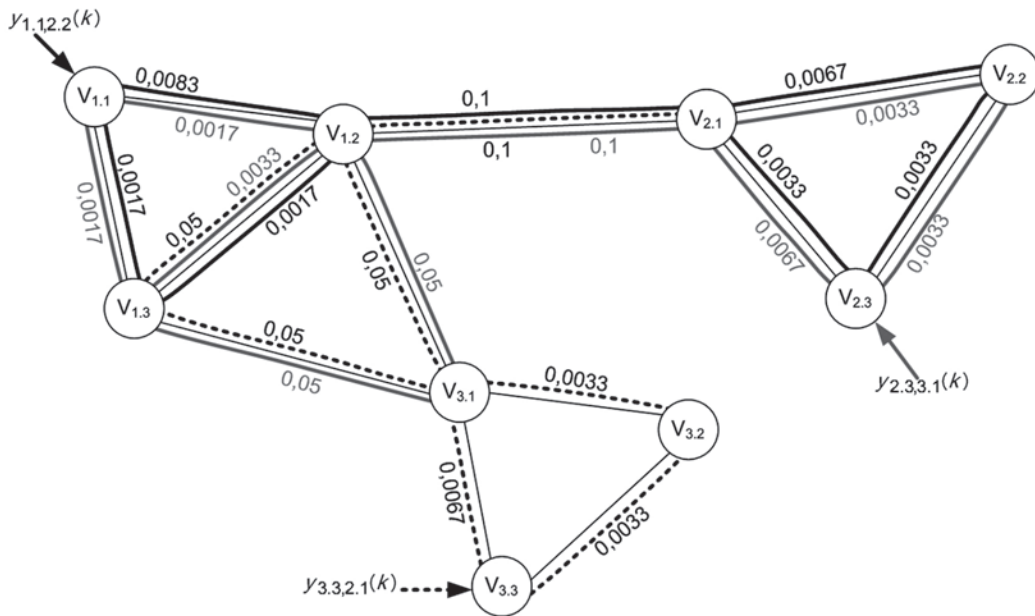


Рис. 11. Результаты решения задач управления в третьей подсети

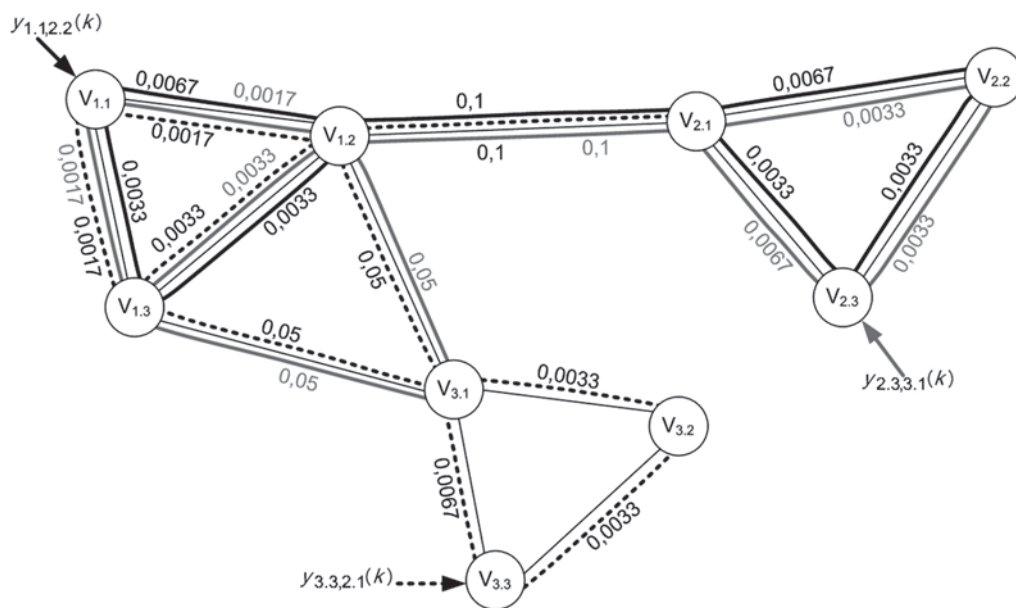
## ВЫВОДЫ

Таким образом, предлагается метод адаптивного управления сетевыми ресурсами иерархической ТКС, в рамках которого исходная задача разделяется на задачу адаптации, связанную с определением объемов поступающей в сеть нагрузки – абонентской и внешней (от других подсетей), и непосредственно задачу управления распределением как этой нагрузки, так и других ресурсов. Основу для решения адаптационных задач составляет идентификационный подход, а задача управления формулируется и решается как оптимизационная.

Основными свойствами предлагаемого метода являются: 1) высокая масштабируемость за счет декомпозиционного решения исходной задачи,



а



б

Рис. 12. Результирующие распределения потоков в сети, полученные при реализации предлагаемого метода (а) и оптимального управления (б)

в рамках которого управление в каждой из подсетей формируется отдельно; 2) введение центра управления сетью, на который возлагаются функции координации действий подсетей, формализованные в виде задачи адаптации второго уровня; 3) допущение неопределенностей по отношению к характеристикам абонентской нагрузки, которые устраняются в ходе решения задачи их идентификации в процессе функционирования.

Взаимодействие между центрами управления сетью и отдельными подсетями построено по принципу последовательной (секвенциальной) координации, согласно которому процесс координации состоит из единоразового обмена координирующими сигналами. Учитывая, что при реализации других декомпозиционных принципов (целевой координации, предсказания взаимодействий), для достижения глобального оптимума целевого функционала требуется, как правило, несколько итераций, связанных со взаимным обменом между различными уровнями управления, переход к единоразовой ее реализации влечет за собой ряд особенностей. В первую очередь данный факт позволяет достичь экономии канальных и временных затрат. Первое достигается за счет уменьшения объемов высокоприоритетного служебного трафика, с передачей значительных объемов которого сопряжена каждая процедура координации. Другое связано со временем, необходимым для принятия решения об удовлетворительном распределении сетевых ресурсов, которое прямо пропорционально количеству координирующих итераций. С другой стороны наличие единственной итерации в процессе взаимодействия двух уровней управления практически не позволяет достичь оптимального в рамках выбранного критерия распределения ресурсов. Однако, как показали результаты моделирования в условиях предлагаемого метода адаптивного управления отклонение получаемого значения целевого функционала от своего оптимума составляет не более 2-3%, а в ряде случаев около 1%, при этом время решения задачи уменьшается в среднем в 4-6 раз по сравнению с декомпозиционным подходом и в сотни раз по сравнению с централизованным решением задачи. На рис. 13 приведен примерный график зависимости времени решения оптимизационной задачи, связанной с минимизацией квадратичного функционала вида (8) при наличии ограничения (3)-(6),  $T_N$ , отнесенного ко времени решения этой же задачи самой низкой размерности (для трех узлов)  $T_{N=3}$ , от количества узлов в сети  $N$ . График был получен для полносвязной сети при длине интервала прогнозирования  $a=2$ .

Получаемое отклонение значения целевого функционала от своего оптимума, как показывают результаты моделирования, напрямую связано со структурой сети: чем меньше связность на межсетевых участках, тем меньшее отклонение наблюдается. Учитывая, что именно низкая меж-

сетевая связность является признаком выделения подсетей в структуре сети, можно говорить о достаточно высокой эффективности предлагаемого метода управления.

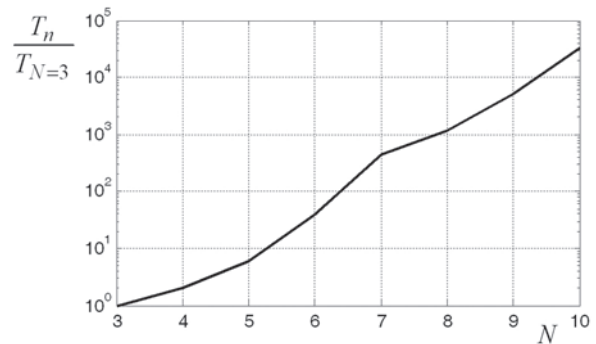


Рис. 13 Относительное время решения задачи управления в зависимости от размерности сети

#### Литература.

- [1] *Математичні основи теорії телекомунікаційних систем* / За заг. ред. В.В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
- [2] *Лемешко О.В., Євсєєва О.Ю., Симоненко Д.В.* Модель динамічного балансування мережних ресурсів у телекомунікаційній мережі // Системи обробки інформації. 2008. Вип. 5 (72). – С. 71-74
- [3] *Євсєєва О.Ю.* Обеспечение гарантированного качества обслуживания в сетях NGN с использованием оценок конечных пользователей // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2008. – Вып. 155. – С. 54-71.
- [4] *Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л.* Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. – М.: Наука, 1981. – 216 с.
- [5] *Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А.* Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
- [6] *Євсєєва О.Ю.* Метод адаптивного управління сетевими ресурсами в умовах неопределенності характеристик трафіка // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2009. Вип. 156. – С. 22-29.
- [7] *Сингх М., Титли А.* Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
- [8] *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
- [9] *Євсєєва О.Ю.* Метод секвенційного управління мережними ресурсами в розподілених ієрархічних телекомунікаційних мережах // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць. 2008. Вип. 49. – С. 226-233

Поступила в редколлегию 17.04.2009



**Євсєєва Оксана Юрьевна**, кандидат технических наук, докторант кафедры телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: оптимизация телекоммуникационных сетей и систем, проблемы управления телекоммуникационными сетями.