

МЕТОД ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С АПЕРИОДИЧЕСКОЙ КООРДИНАЦИЕЙ ПО УСЛОВИЯМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Введение

Управление канальными, буферными и информационными ресурсами современных территориально-распределенных телекоммуникационных сетей (ТКС) неразрывно сопряжено со следующей дилеммой, возникающей в процессе разработки соответствующих моделей и методов: с одной стороны необходимо обеспечить гарантии качества обслуживания (Quality of Service, QoS), а с другой – высокую масштабируемость полученных решений. Особенно это проявляется при разделении функций и областей применения архитектурных моделей дифференцированных и интегрированных служб, соответственно Differentiated Services (DiffServ, RFC-2475) и Integrated Services (IntServ, RFC-1633) [1, 2]. Так, хорошо масштабируемая модель DiffServ не обеспечивает жестких гарантий относительно уровня качества обслуживания, а модель гарантированного качества обслуживания IntServ, основанная на резервировании сетевых ресурсов с помощью протокола RSVP (Resource Reservation Protocol, RFC-2205), напротив, плохо поддается масштабированию. Как следствие, в современных сетевых решениях на магистральных участках территориально-распределенных ТКС преимущественно используется модель DiffServ, основанная на оптимизации обслуживания пакетов в отдельных сетевых узлах, а областью применения модели IntServ стали небольшие по размеру сети, например сети доступа.

В результате с повышением требований пользователей к уровню качества предоставляемых услуг на первый план выходит задача поиска компромиссных решений, способных обеспечить одновременно и необходимую масштабируемость, и гарантии качества обслуживания «из конца в конец», т.е. по «сквозным» показателям QoS. Источником разрешения отмеченного противоречия может служить применение иерархического подхода, сочетающего в себе преимущества централизованного и децентрализованного (распределенного) управления сетевыми ресурсами. Актуальной представляется задача, связанная с разработкой методов иерархического управления сетевыми ресурсами в территориально-распределенных ТКС, которые могли бы быть положены в основу перспективных сетевых решений – протоколов маршрутизации и резервирования ресурсов, механизмов управления очередями и пропускной способностью трактов передачи сети, а также моделей (технологий) обеспечения качества обслуживания.

Анализ известных решений в области иерархического управления сетевыми ресурсами в ТКС

Известен ряд подходов к организации иерархического управления сетевыми ресурсами в ТКС, основанных на применении различных принципов (методов) координации. Например, в работе [3] предложено решение задачи иерархической маршрутизации с применением модифицированного метода целевой координации, в рамках которого распределение межсетевых ресурсов возлагается на подсети с периодической координацией полученных решений верхним уровнем управления (координатором сети). В работах [4, 5] рассмотрены случаи комплексного применения различных принципов (методов) координации на различных уровнях иерархии управления. Например, в работе [4] изложены особенности комбинации преимуществ метода оценки взаимодействий и целевой координации, а в работе [5] – методов прогнозирования взаимодействий и целевой координации. В методах прогнозирования и оценки взаимодействий предполагается, что за управление на межсетевом участке в целом отвечает координатор сети, но в первом методе он непосредственно определяет управляющее воздействие на этом участке, а во втором – указывает область (ограничения) на использование межсетевого ресурса со стороны отдельных подсетей.

Основное преимущество указанных методов состоит в высоком качестве получаемых решений, соизмеримом с качеством централизованного управления. Это достигается за счет периодической координации решений, получаемых в рамках отдельных подсетей. При этом до тех пор, пока решение не будет скоординировано, оно в самих подсетях не будет реализовано. Поэтому, процесс принятия решений с использованием в «чистом» виде указанных принципов (методов) координации связан с многонтерационным обменом служебной и управляющей информацией между различными иерархическими уровнями управления и, в конце концов, способствует росту инерционности управления в целом. В этой связи, заслуживает внимания подход, основанный на реализации аperiodической стратегии координации или координации по требованию, которое может исходить, например, от перегруженных подсетей. Вариант реализации аperiodической координации по устойчивости подсетей изложен в работе [6], в данной работе предлагается развитие данного направления с точки зрения учета требований к гарантированному QoS.

Математическая модель иерархическо-координационного управления сетевыми ресурсами

В общем случае структура ТКС может быть представлена в виде графа $\Gamma(V, D)$, множество вершин $V_j, j = \overline{1, N}$, которого составляют сетевые узлы-маршрутизаторы, а множество дуг $D_{i,j}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j$ моделируют тракты передачи между маршрутизаторами. В соответствии с иерархическим представлением ТКС в виде совокупности взаимодействующих подсетей (автономных систем в технологии IP (Internet Protocol) или кластеров в технологии ATM (Asynchronous Transfer Mode)), представим каждую из них в виде подграфа $\Gamma_q(V^q, D^q)$ графа $\Gamma(V, D)$, в котором V^q и N_q – соответственно подмножество маршрутизаторов и их общее число в q -й подсети ТКС; D^q – множество трактов передачи ТКС, принадлежащих q -й подсети. Пусть общее число подсетей равно Q . Условимся, что подмножества V^q не пересекаются, а различные подмножества D^q ($q = \overline{1, Q}$) могут иметь общие элементы (рис. 1).

Функциональная сторона ТКС может быть описана динамической моделью, представленной системой разностных уравнений состояния сети [3, 7]

$$x_{i(q),j(g)}(k+1) = x_{i(q),j(g)}(k) - \sum_{\substack{V_l \in V^q \\ l \neq i(q)}}^{N_q} b_{i(q),l}(k) u_{i(q),l}^{j(g)}(k) + \sum_{\substack{V_m \in V^q \\ m \neq i(q), j(g)}}^{N_q} b_{m,i(q)}(k) u_{m,i(q)}^{j(g)}(k) + \\ + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq q}}^Q \left[\sum_{\substack{V_n \in V^p \\ n \neq j(g)}}^{N_p} b_{n,i(q)}(k) u_{n,i(q)}^{j(g)}(k) - \sum_{V_r \in V^p}^{N_p} b_{i(q),r}(k) u_{i(q),r}^{j(g)}(k) \right] + y_{i(q),j(g)}(k) \quad , (1)$$

где $b_{m,i(q)}(k) = c_{m,i(q)}(k) \Delta t$; $c_{i(q),j(p)}(k)$ – скорость передачи данных от узла V_i^q к узлу V_j^p в момент времени t_k ; $x_{i(q),j(g)}(k)$ – объем данных, находящихся на узле V_i^q и предназначенных для передачи узлу V_j^g в момент времени t_k ; $u_{i(q),l}^{j(p)}(k)$ – доля пропускной способности тракта передачи $D_{i(q),l}(g)$, выделенная информационному потоку с адресом V_j^p в момент времени t_k , и трактуемая в дальнейшем как управляющая переменная;

$y_{i(q),j(g)}(k) = \xi_{i(q),j(g)}(k)\Delta t$, $\xi_{i(q),j(g)}(k)$ – средняя интенсивность поступления данных от абонентов ТКС на узел V_i^q в момент времени t_k с адресатом узла V_j^g ; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – период перерасчета управляющих переменных.

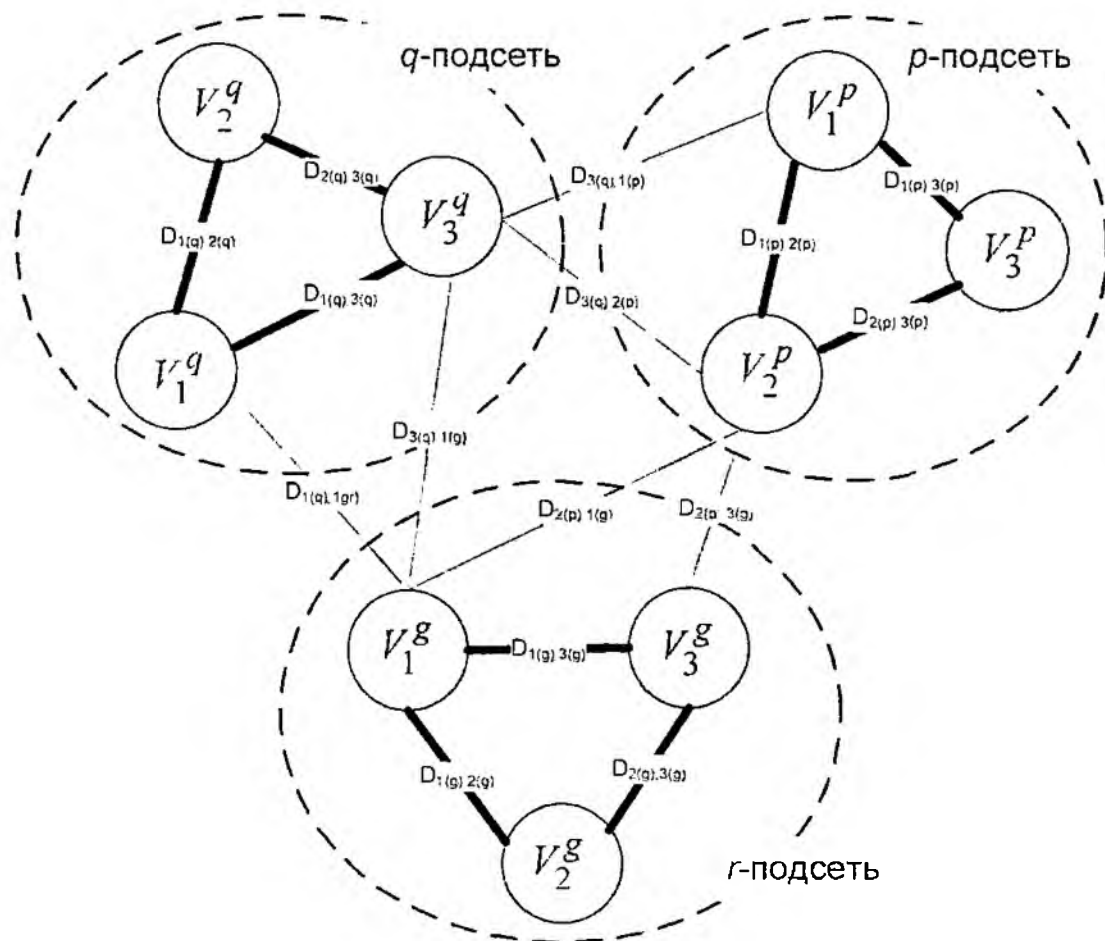


Рис. 1

Характерной особенностью данной модели является то, что численные значения управляющих переменных $u_{i(q),l(g)}^{j(p)}(k)$ обуславливают конечный результат решения задач управления сетевыми ресурсами – маршрутизации, распределения канального ресурса, а также непосредственно определяют порядок решения задач управления очередями (1).

Система скалярных разностных уравнений динамики информационного обмена между отдельными узлами q -й подсети ($q = \overline{1, Q}$) ТКС (1) может быть представлена в векторно-матричной форме, характеризующей динамику информационного обмена в рамках данной подсети:

$$X_q(k+1) = X_q(k) + B'_q(k)U'_q(k) + B''_q(k)U''_q(k) + Y_q(k) \quad (q = \overline{1, Q}). \quad (2)$$

где $X_q(k)$ – вектор состояния q -й подсети, который объединяет переменные $x_{i,j}(k)$, такие, что $V_i \in V^q$, $V_j \in V$, и имеет размерность $N_q(N-1)$; $U'_q(k)$ – вектор управления ресурсами q -й подсети, объединяющий переменные $u_{i,j}^j(k)$, такие, что $V_i, V_j \in V^q$, $V_j \in V$, $i \neq j$; $U''_q(k)$ – вектор управления взаимодействием q -й подсети с другими подсетями, объеди-

няющий переменные $u_{i,j}^j(k)$, такие, что $V_i \in V^q$, $V_j \in V^g$ или $V_i \in V^q$, $V_j \in V^g$, $q \neq g$, $V_j \in V$: матрицы $B'_q(k)$ и $B''_q(k)$ формируются на основе величин $\pm b(k)$ из уравнения (1); $Y_q(k)$ – вектор абонентской нагрузки на узлы q -й подсети.

Система уравнений (2) может быть далее обобщена и представлена в виде

$$X(k+1) = X(k) + B(k)U(k) + Y(k), \quad (3)$$

где матрица $B = \text{blocdiag} [B'_1, B''_1, \dots, B'_q, B''_q, \dots, B'_Q, B''_Q]$ имеет блочно-диагональную структуру, а векторы состояния и управления представляются в виде

$$X(k) = \begin{bmatrix} X_1(k) \\ \vdots \\ X_q(k) \\ \vdots \\ X_Q(k) \end{bmatrix}; \quad U(k) = \begin{bmatrix} U_1(k) \\ \vdots \\ U_q(k) \\ \vdots \\ U_Q(k) \end{bmatrix}; \quad U_q(k) = \begin{bmatrix} U'_q(k) \\ U''_q(k) \end{bmatrix}.$$

С целью предотвращения перегрузки сетевых узлов и трактов передачи на переменные состояния и управления накладываются ограничения вида

$$0 \leq x_{i(q),j(g)}(k) \leq x_{i(q),j(g)}^{\max}, \quad (4)$$

$$0 \leq u_{i(q),j}^{j(g)}(k), \quad \sum_{j=1}^N u_{i(q),j}^{j(g)}(k) \leq 1, \quad (5)$$

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

Исходя из условия согласованного управления общими (совместными) канальными ресурсами в различных подсетях, на вектор управления взаимодействием подсетей накладываются ограничения вида [3]

$$U_q''(k) = \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k), \quad (6)$$

где F_{qp} – матрица, определяющая взаимосвязь между векторами управления взаимодействием q -й и p -й подсетей, элементы которой выбираются из условия равенства соответствующих компонент векторов $U_q''(k)$ и $U_p''(k)$.

При реализации многопутевой стратегии маршрутизации в рамках динамического управления буферными и канальными ресурсами для обеспечения сквозного QoS по *скоростным показателям* необходимо выполнить условие

$$\zeta_{i,j}(k) \leq \sum_{k=1}^{K_{(i,j)}} c_{(i,j)}^k, \quad (7)$$

где $K_{(i,j)}$ – количество используемых путей между i -м и j -м узлами сети; $c_{(i,j)}^k$ – пропускная способность k -го пути (пути P_k) между i -м и j -м узлами сети.

Для *временных показателей* QoS (средняя задержка вдоль маршрута, джиттер), относящихся к классу аддитивных, искомые ограничения в общем виде могут быть записаны в виде

$$\tau_{(i,j)}^{mpb} \geq \tau_{i,l}^k + \dots + \tau_{r,d}^k + \dots + \tau_{z,j}^k = \sum_{(r,d) \in P_k} \tau_{r,d}^k, \quad k \in K_{i,j}, \quad (8)$$

где $\tau_{r,d}^k$ – текущее значение средней задержки пакетов в тракте (r, d) k -го пути; $\tau_{(i,j)}^{mpb}$ – требуемое значение задержки пакетов трафиков между i -м и j -м узлами вдоль всего множества путей $K_{i,j}$.

Для показателей надежности доставки, относящихся к классу вероятностных, в общем виде искомые условия можно представить в мультипликативной форме:

$$p_{(i,j)}^{mpb} \leq p_{i,l}^k \times \dots \times p_{r,d}^k \times \dots \times p_{z,j}^k = \prod_{(r,d) \in P_k} p_{r,d}^k, \quad k \in K_{i,j}, \quad (9)$$

где $p_{r,d}^k$ – вероятность своевременной доставки пакетов в тракте (r, d) k -го пути; $p_{(i,j)}^{mpb}$ – требуемое значение вероятности своевременной доставки пакетов трафиков между i -м и j -м узлами вдоль всего множества путей $K_{i,j}$.

Приведенные в общем виде условия обеспечения гарантированного качества обслуживания по скоростным (7), временным (8) показателям и показателям надежности (9) согласно результатам работ [8, 9] можно представить в виде аналитических зависимостей от структурных и функциональных параметров сети, а также характеристик трафика и требуемых значений показателей QoS. Это удалось получить благодаря тензорному обобщению математической модели ТКС. Подробно не останавливаясь на процедурных аспектах вывода [8, 9], предложим следующие условия гарантированного качества обслуживания, выступающие в качестве дополнительных ограничений при решении задачи динамического управления сетевыми ресурсами в ТКС:

1. Для временных и скоростных показателей QoS:

$$\tau_{(i,j)}^{mpb} \geq \left(\langle 4.1 \rangle E_{(i,l)}^{(\pi\eta)} - \left[\langle 4.2 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \right] \left[\langle 4.4 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \right]^{-1} \left[\langle 4.3 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \right] \right)^{-1} \zeta_{i,j}(k) \quad (10)$$

при
$$\left\| \begin{array}{c|c} \langle 1 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 2 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \\ \hline \langle 3 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 4 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \end{array} \right\| = E_{(i,j)}^{(\pi\eta)}, \quad \left\| \begin{array}{c|c} \langle 4.1 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 4.2 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \\ \hline \langle 4.3 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 4.4 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \end{array} \right\| = \langle 4 \rangle E_{(i,j)}^{(\pi\eta)},$$

где $E_{(i,j)}^{(\pi\eta)}$ – проекция в рамках тензорной модели метрического тензора E в системе координат базисных контуров (π) и узловых пар (η) сети [8-10].

2. Для скоростных показателей и показателей надежности (вероятностных показателей) QoS:

$$p_{(i,j)}^{mpb} \leq \left(\langle 4.1 \rangle X_{(i,l)}^{(\pi\eta)} - \left[\langle 4.2 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \right] \left[\langle 4.4 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \right]^{-1} \left[\langle 4.3 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \right] \right)^{-1} \zeta_{i,j}(k) \quad (11)$$

при
$$\left\| \begin{array}{c|c} \langle 1 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 2 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \\ \hline \langle 3 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 4 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \end{array} \right\| = X_{(i,j)}^{(\pi\eta)}, \quad \left\| \begin{array}{c|c} \langle 4.1 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 4.2 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \\ \hline \langle 4.3 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} & \langle 4.4 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)} \end{array} \right\| = \langle 4 \rangle X_{(i,j)}^{(\pi\eta)},$$

где $X_{(i,j)}^{(\pi\eta)}$ – проекция метрического тензора X в системе координат базисных контуров и узловых пар.

Метрический тензор определяет, как показано в работах [8, 9], модель обслуживания пакетов на сетевых узлах и в трактах передачи. Для наглядности индексы подсетей в выражениях (10) и (11) опущены, хотя предполагается, что гарантии качества обслуживания должны обеспечиваться как между узлами одной подсети, так и между узлами различных подсетей, что особенно важно при дальнейшей разработке метода иерархического управления ресурсами телекоммуникационной сети.

Метод иерархического управления ресурсами телекоммуникационной сети с аperiodической координацией

В соответствии с общими принципами иерархическо-координационного подхода к управлению сетевыми ресурсами в ТКС предполагается, что управление в отдельных подсетях может осуществляться относительно автономно (независимо) друг от друга на основании локальных критериев – критериев оптимальности управления. В последующем решении, получаемые в подсетях, подлежат координации более высоким уровнем управления. Координация может быть периодической и аperiodической. В случае периодической координации координирующие управляющие переменные пересчитываются через определенный, как правило, фиксированный временной интервал – таймер [11]. Это период может совпадать с периодом перерасчета управления по подсетям, но в частном случае период перерасчета координирующих переменных U'' может и отличаться от периода перерасчета управления по подсетям U' . Аperiodичность координации в данном случае может означать отсутствие четко определенного периода (таймаута) перерасчета координирующих переменных. Реализация идей аperiodической координации может быть основана, например, на расчете переменных, отвечающих за координацию, по требованию одной или нескольких подсетей.

Периодическая координация тем эффективнее, чем выше взаимозависимость управляемых подсистем. Однако при декомпозиции ТКС на подсети, как правило, исходят из следующих критериев структурного или функционального характера [12]: во-первых, связность узлов подсети выше связности узлов между подсетями, во-вторых, динамика изменения загрузки трактов передачи между подсетями несколько ниже, чем трактов передачи внутри подсетей. Таким образом, в рамках предлагаемого метода предполагается реализация периодической координации с периодом перерасчета координирующих переменных $\Delta t''$ большим, чем период перерасчета управления по подсетям Δt , т.е. $\Delta t'' > \Delta t$. А также с целью повышения гибкости управления сетевыми ресурсами в рамках разрабатываемого метода предполагается возможность аperiodического перерасчета координирующих переменных U'' при невозможности выполнения в той или иной сети (сетях) заранее оговоренных в SLA-договоре (Service Level Agreement) условий обеспечения гарантированного качества обслуживания (10) и (11). Причиной тому может быть, например, нарушение структуры подсети или существенное изменение интенсивностей абонентских потоков, что, в свою очередь, может быть вызвано изменением порядка подключения абонентов или изменением структуры сетей доступа. Координация в данном случае может быть обусловлена случайным характером перечисленных факторов и подразумевает переориентирование порядка использования межсетевых ресурсов ТКС преимущественно в интересах "нуждающихся" подсетей. Это возможно за счет перерасчета векторных переменных $U_q''(k)$, определяющих порядок использования трактов передачи между подсетями ТКС.

Исходя из приведенной выше математической модели ТКС (1) – (11) в основу метода будет положено решение оптимизационной задачи, связанной с минимизацией квадратичного целевого функционала вида

$$J = \sum_{q=1}^Q J_q = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=0}^{a-1} \{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) \}, \quad (12)$$

где параметр a характеризует интервал оптимизации T ($T = (a-1)\Delta t$), который можно трактовать как период прогнозирования процессов маршрутизации и управления каналным буферным ресурсом; W_q^x – диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, определяемая приоритетностью очередей на узлах q -й подсети; W_q' и W_q'' – диагональные неотрицательно определенные весовые матрицы, определяемые важностью отдельных трактов передачи q -й подсети и между подсетями соответственно.

В общем случае для учета ограничения на взаимодействие подсетей (6) введем в рассмотрение лагранжиан

$$L(k) = \sum_{q=1}^Q \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + \Lambda_q^T(k) \left[U_q''(k) - \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) \right] \right\} \quad (13)$$

где $\Lambda_q(k)$ – векторы множителей Лагранжа ($q = \overline{1, Q}$).

Учитывая, что

$$\sum_{q=1}^Q \Lambda_q^T(k) \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) = \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T(k) F_{pq} U_q''(k),$$

лагранжиан (13) модифицируется к виду

$$L(k) = \sum_{q=1}^Q \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) - U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + U_q''^T(k) \left[\Lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T(k) F_{qp} \right] \right\}. \quad (14)$$

В данном случае составляющие лагранжиана (14) имеют вид

$$L_q(k) = X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + U_q''^T(k) \left[\Lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T(k) F_{qp} \right], \quad (15)$$

а также выполняется равенство

$$L(k) = \sum_{q=1}^Q L_q(k).$$

Особенностью представления (14) является то, что каждая из составляющих $L_q(k)$ является функцией векторов состояния, управления, взаимодействия подсетей и векторов множителей Лагранжа, которые относятся только к q -й подсети. Таким образом, в соответствии с преследуемой целью и проведенными преобразованиями задача оптимального управления

сетевыми ресурсами в ТКС в целом оказалась декомпозируемой на Q подзадач, каждая из которых может решаться независимо одна от другой. Решение оптимизационных задач (15) обуславливает нижний (декомпозиционный) уровень решения оптимизационной задачи (12). На верхнем уровне управления возьмем за основу метод прогнозирования взаимодействий [13], где в качестве координирующих переменных уже выступают векторы $\Lambda_q(k)$ и $U_q''(k)$, что несколько усложняет работу этого уровня, но разгружает нижний уровень, т.к. минимизация (15) осуществляется лишь по переменным $U_q'(k)$.

Применение к решению задачи нижнего уровня принципа целевой координации [13, 14] предполагает введение двойственной функции

$$\max_{\mu} M_q(\mu); M_q(\mu) = \min_{X_q, U_q'} P^q(X_q, U_q', U_q'' - \mu_q); \quad (16)$$

$$P^q = X_q^T(a)W_q^x X_q(a) + \sum_{k=0}^{a-1} [X_q^T(k)W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k)W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k)W_q'' U_q''(k) + \mu_q(k)[X_q(k) + B_q'(k)U_q'(k) + B_q''(k)U_q''(k) - X_q(k+1)]] \quad (17)$$

где P^q – лагранжиан, полученный из J_q (12) путем введения ограничения (2); μ_q – вектор множителей Лагранжа для q -й подсети размерности $N_q(N-1)$.

При фиксированных $\mu = \mu^*$ лагранжиан (17) может быть декомпозицирован по индексу k и представлен в виде $P^q = \sum_{k=0}^a P_k^q$.

Окончательные выражения для лагранжианов, подлежащие оптимизации имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} P_0^q &= H_q[X_q(0), U_q'(0), U_q''(0)] \\ P_k^q &= H_q[X_q(k), U_q'(k), U_q''(k), k] - \mu_q^{*T}(k-1)X_q(k); \\ P_a^q &= X_q^T(a)W_q^x X_q(a) - \mu_q^{*T}(a-1)X_q(a). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где $\mu(-1) = 0$; H_q – гамильтониан для q -й подсети, который определяется как

$$H_q[X_q(k), U_q'(k), U_q''(k), k] = X_q^T(k)W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k)W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k)W_q'' U_q''(k) + \mu_q(k)[X_q(k) + B_q'(k)U_q'(k) + B_q''(k)U_q''(k)]. \quad q = \overline{1, Q}, k = \overline{0, a}.$$

Таким образом, решение задачи иерархическо-координационного управления сетевыми ресурсами в ТКС, формализованное в виде оптимизационной задачи по минимизации стоимостного функционала (12) с целью определения управляющих переменных, в рамках предлагаемого метода сводится к следующей последовательности действий (рис. 2).

1) Сбор в центре (сервере) управления ресурсами сети (ЦУРС) информации о текущем значении управляющих переменных $U_q^{*}(k)$ ($q = \overline{1, Q}$), текущем состоянии отдельных подсетей с целью формирования вектора начальной загрузки сетевых узлов $X(0)$, прогнозируемой интенсивности поступления абонентской нагрузки ($Y(k)$) и доступных канальных ресурсов с целью формирования матрицы $B(k)$, $k = \overline{0, a-1}$.

2) Расчет на ЦУРС векторов межсетевого взаимодействия $U_q^{*}(k)$ ($q = \overline{1, Q}$) в результате решения задачи минимизации (12) по переменным $U''(k)$ с учетом собранной ранее исход-

ной информации, а также с учетом ограничений (3), (4) – (6), (10), (11) на переменные состояния и управления при фиксированных векторах $U_q^{*}(k)$ ($q=1, Q$). Рассылка рассчитанных в ЦУРС векторов $U_q^{**}(k)$ ко всем центрам управления ресурсами подсетей (ЦУРП).

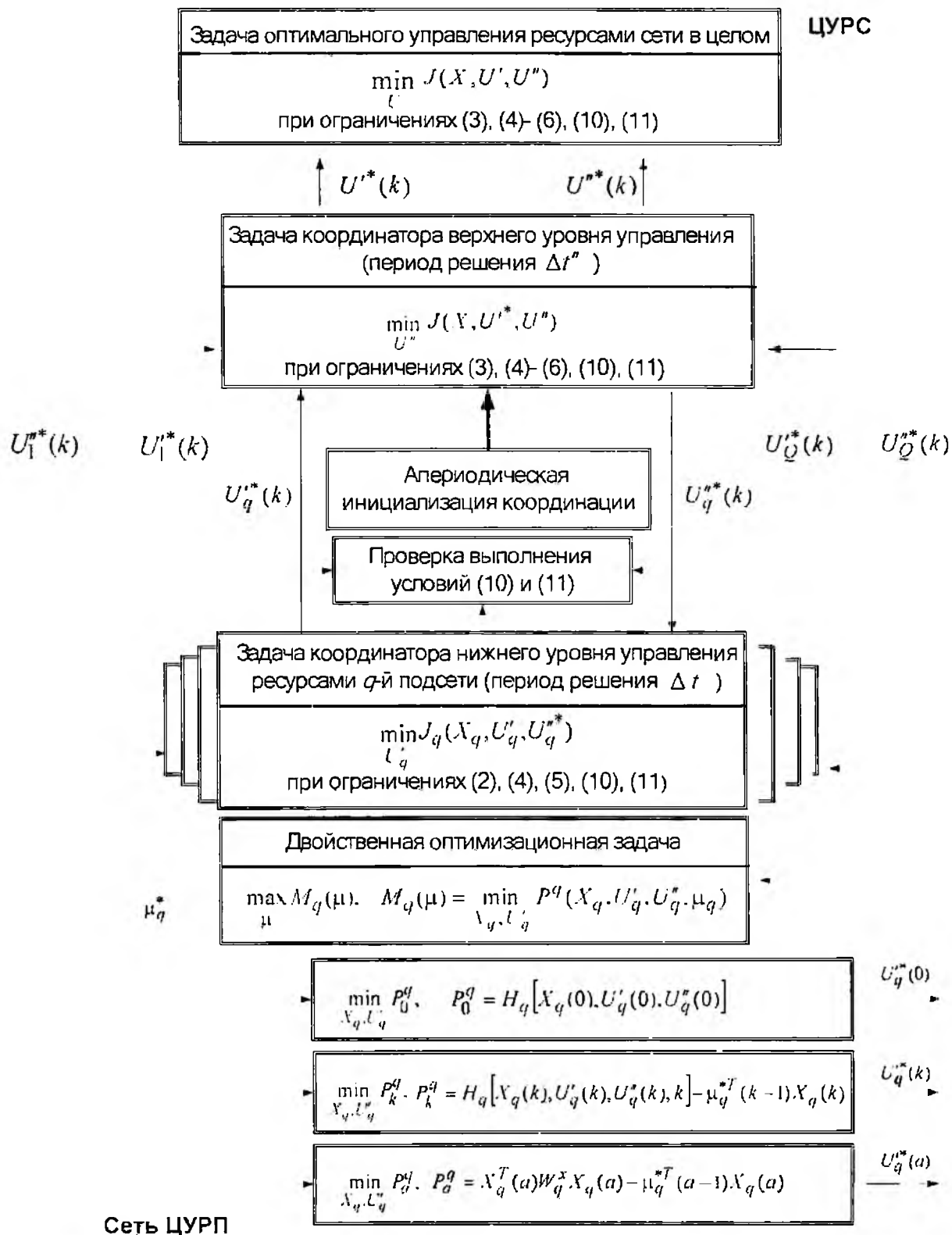


Рис. 2

3) Решение на каждом q -м ЦУРП оптимизационной задачи по минимизации J_q (12) только по переменным $U'_q(k)$, $k = \overline{0, a-1}$ при ограничениях (2). (4). (5). (10). (11). При этом в качестве исходных данных выступают вектор $U_q^{**}(k)$, $k = \overline{0, a-1}$, полученный из ЦУРС, вектор текущего состояния сети $X_q(0)$, а также матрица $B_q(k)$, $k = \overline{0, a-1}$. Для решения данной задачи можно использовать известные методы оптимального управления – метод Беллмана, Понтрягина и др. [15]. Для примера в рамках данного метода может быть использован метод целевой координации [14]:

- Формирование вектора множителей Лагранжа $\mu_q^*(k)$, $k = \overline{0, a-1}$.
- Минимизация P_k^q (18) по переменным $U'_q(k)$ для каждого отдельного k -го временного интервала.
- Координация полученных для отдельных k значений векторов $U_q^{**}(k)$, для чего осуществляется решение двойственной задачи максимизации $M_q(\mu)$ (16) по переменным μ_q с помощью градиентной процедуры. Если градиент двойственной функции приближается к нулю, то значения $U_q^{**}(k)$ фиксируются и передаются в ЦУРП. В противном случае осуществляется переход к п. 3.2.

4) Проверка выполнения условий обеспечения гарантированного качества обслуживания (10) – (11). В случае невыполнения этих условий, что связано с недостатком выделенных той или иной подсети межсетевых ресурсов, осуществляется аperiodическая инициация процедуры координации, т.е. переход к п.2.

5) По истечении интервалов перерасчета $\Delta t'$ и (или) $\Delta t''$ осуществляется переход к п.3 или п.2 соответственно. При условии достижения функцией (12) своего оптимума в п.2 и (или) в п.3 на основании рассчитанных в ЦУРС и ЦУРП значений векторов $U_q^{**}(k)$ и $U_q^{**}(k)$ формируются планы распределения сетевых ресурсов, которые через ЦУРП доводятся до всех узлов подсетей.

Выводы

Таким образом, предложен метод иерархическо-координационного управления сетевыми ресурсами в ТКС, который сочетает в себе преимущества децентрализованного и централизованного управления, периодической и аperiodической координации, что позволит обеспечить более высокую масштабируемость и оперативность в принятии решений, а также существенно снизить объемы передаваемой служебной информации за счет сокращения числа итераций координирующей процедуры. Метод, согласно требованиям практики, ориентирован на достижение заданных значений выбранных показателей качества обслуживания при минимизации использования доступных сетевых (информационных, буферных и канальных) ресурсов, что является основной целью функционирования современных и перспективных ТКС.

Развитие предложенных решений видится в обосновании выбора тех или иных параметров модели, особенно это касается отношения периодов перерасчета управляющих переменных внутри и между подсетями. В случае незначительной доли межсетевого трафика по отношению к его общему объему в ТКС целесообразно выбрать $\Delta t'' \gg \Delta t'$, в противном случае $\Delta t'' \approx \Delta t'$, что приводит к необходимости пересмотра критериев декомпозиции ТКС на подсети, их количества и состава.

Список литературы: 1. *Вегенша Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. 386 с. 2. *Дансмор Б., Скандьер Т.* Справочник по телекоммуникационным технологиям: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 640 с. 3. *Лемешко А.В.* Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые ин-

формационные и компьютерные интегрированные технологии. 1998. Вып. №1. С. 323-328. 4. *Евсеева О.Ю., Беленков А.Г., Алексеев С.В.* Распределение нагрузки в иерархических телекоммуникационных сетях декомпозиционным методом // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2005. № 142. С.63-70. 5. *Беленков А.Г., Евсеева О.Ю., Лемешко А.В.* Метод распределения нагрузки в иерархических телекоммуникационных сетях на базе декомпозиционных принципов предсказания взаимодействий и целевой координации // Праці УНДІРТ. 2005. №2(42). С. 11-16. 6. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Симоненко Д.В.* Модифицированный метод целевой координации задач управления сетевыми ресурсами в территориально-распределенных телекоммуникационных системах // Наукові записки УНДІЗ. 2007. Вип. 2. С. 22-32. 7. *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data-communication networks // IEEE Trans. on communication. 1977. Vol. 25, № 1. P. 85-95. 8. *Лемешко А.В.* Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной // Праці УНДІРТ. Вип. №4 (40). Одеса: Видання УНДІРТ, 2004. С. 12-18. 9. *Лемешко А.В.* Вероятностно-временная модель QoS маршрутизации с предвычислением путей в условиях неидеальной надежности элементов телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2005. Вып. 142. С. 11-20. 10. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1978. 719 с. 11. *Остерлах Х.* Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. С.Пб.: ВІУ-С Пб., 2002. 512 с. 12. *Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За заг. ред. В.В. Поповського.* Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с. 13. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с. 14. *Сингх М., Гитли А.* Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение. 1986. 494 с. 15. *Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского.* М.: Наука, 1987. 712 с.

*Харьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 05.08.2008