

УДК 621.391

О.Ю. Евсева, Мохаммед Б. Кадер

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## МНОГОУРОВНЕВЫЙ ИЕРАРХИЧЕСКИЙ МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ ДОСТАВКИ КОНТЕНТА

*На основании количественных результатов анализа различных математических моделей и, соответственно, различных принципов распределения ресурсов был предложен иерархический трехуровневый метод комплексного управления ресурсами гибридной сети доставки контента. Метод ориентирован на совместное решение задач распределения контента, маршрутизации запросов и маршрутизации в телекоммуникационной сети. Однако за счет иерархического управления удается избежать чрезмерного усложнения процесса управления, а за счет комбинации различных принципов удается снизить стоимость размещения контента на различных серверах и при этом обеспечить высокое качество обслуживания запросов.*

**Ключевые слова:** гибридные сети доставки контента, математическая модель, иерархическое управление ресурсами.

### Введение

Целью создания гибридных сетей доставки контента (Hybrid Content Delivery Network, HCDN) является повышение эффективности системы хранения и доставки контента пользователю путем интеграции двух принципиально разных подходов: реализующих в чистом виде принцип взаимодействия «клиент-сервер» традиционных сетей доставки контента CDN и базирующихся на принципах «равноправного» однорангового взаимодействия пиринговых сетей (Peer-to-Peer, P2P) [1, 2].

### Требования к управлению ресурсами в гибридных сетях доставки контента

Традиционные сети доставки контента CDN, примерами которых являются сети Akamai и Limelight, обеспечивают высокое качество предоставляемых услуг за счет использования для хранения контента совокупности зеркалирующих (периферийных) серверов, которые географически расположены на удалении от основного сервера и друг от друга, но вблизи от потребителя услуг [3]. Клиент-серверная архитектура сети обеспечивает гаранти-

рованное качество доставки контента, однако требует решения ряда задач управления, среди которых репликация контента на периферийных серверах и их синхронизация; управление доступом к контенту; аутентификация, авторизация, учет пользователей; маршрутизация запросов пользователей на тот или иной сервер; обеспечение надлежащей информационной безопасности как периферийных, так и основных серверов. В то же время в пиринговых сетях, где каждый хост (клиент) одновременно является как потребителем услуги, так и ее поставщиком, за счет совместного использования географически распределенных ресурсов достигается существенное снижение стоимости предоставляемых услуг, повышается масштабируемость и надежность системы. При этом основные недостатки пиринговых сетей связаны с принципиальной невозможностью предоставления услуг гарантированного качества, а также с низким уровнем информационной безопасности и созданием так называемого «недружественного трафика» (ISP-unfriendly traffic) [1, 2]. Таким образом, объединение принципов CDN и P2P в рамках единой гибридной сети, предоставляющее пользователю возможность загрузки контента с сервера CDN и/или с выполняющих роль серверов хостов P2P, позволяет снизить стоимость услуг, сохраняя при этом высокое качество их предоставления, повысить надежность и масштабируемость системы в целом.

С точки зрения организации логических связей в рамках гибридной сети доставки контента, как показывает анализ, наиболее перспективной видится модель взаимодействия, в которой ресурсы одной CDN доступны для нескольких P2P-сетей, а интеграция технологий CDN и P2P осуществляется по принципу CAP (CDN-aided P2P), где основная роль отводится P2P-сети. P2P-сеть дополняется CDN-серверами, которые будут задействованы только в том случае, если запрашиваемый контент не может быть предоставлен P2P-сетью [2].

Переход к гибридным сетям HCDN неизбежно влечет за собой пересмотр принципов управления системой доставки контента, включая управление ее ресурсами. В условиях гибридизации к системам управления выдвигаются следующие требования:

- поскольку архитектура HCDN носит четко выраженный иерархический характер, ее система управления так же должна быть иерархической, т.е. сочетать в себе централизованный, основанный на информации о глобальном состоянии подход, используемый в CDN, и принципы локального, децентрализованного управления, реализуемого в P2P;

- с целью организации эффективного использования всех типов ресурсов распределение нагрузки между CDN и P2P-сетями, а также использования ресурсов внутри каждой из них должно быть сбалансированным;

- поскольку сети доставки контента по своей сути являются оверлейными сетями, в процессе принятия управляющего решения необходимо учитывать состояние нижележащей инфраструктуры, т.е. управление вычислительными ресурсами серверов CDN и P2P должно быть скоординировано с распределением канальных и буферных ресурсов телекоммуникационной сети (ТКС), обеспечивающей транспортные функции по доставке контента.

Как показывает анализ, задача управления ресурсами сети доставки контента трактуется преимущественно с точки зрения одного типа ресурса – производительности основного и периферийных серверов, не отвечая тем самым всем перечисленным выше требованиям [1]. Так традиционно задача маршрутизации запросов сводится к выбору сервера, на который будет перенаправлен запрос для дальнейшего обслуживания, и в такой постановке относится к задачам управления сервисами, которые решаются отдельно от задач маршрутизации потоков трафика, обеспечивающих доставку контента на сетевом уровне (в транспортной телекоммуникационной сети). Кроме того, при решении задачи маршрутизации запросов преобладают эвристические подходы, где решение сводится к выбору «лучшего» по результатам пассивного или активного мониторинга контент-сервера, на который и направляется запрос [1, 4]. В этой связи актуальной является задача разработки математических моделей и методов управления ресурсами гибридной сети доставки контента, учитывающие состояние телекоммуникационного компонента и нацеленные на сбалансированное использование ресурсов различных типов.

Анализ различных математических аппаратов, используемых для решения задач распределения ресурсов в области телекоммуникаций, определяет приоритетное использование потоковых моделей, оперирующих потоками и их интенсивностями и основанными на законе сохранения Форда-Фалкерсона.

### Математическая модель сети доставки контента

Процесс функционирования сети доставки контента и лежащей в ее основе ТКС всецело зависит от их структурных характеристик, определяемых связями между основными элементами системы: серверами P2P-сетей, серверами CDN и маршрутизаторами ТКС. Для описания структурных свойств HCDN введем граф  $G = \{N, E\}$ , множество вершин которого  $N$  моделирует серверы P2P-сетей ( $N^{P2P}$ ), серверы CDN ( $N^{CDN}$ ) и маршрутизаторы транспортной телекоммуникационной сети ( $N^{TTN}$ ), т.е.  $N = N^{P2P} \cup N^{TTN} \cup N^{CDN}$ . Множество ветвей

Е графа G отображает множество трактов передачи как между маршрутизаторами ТКС, так и между маршрутизаторами и серверами различных типов. Например, для сети, представленной на рис. 1, соответствующий граф показан на рис. 2.

Поскольку в соответствии с архитектурой построения HCDN в качестве источников контента и соответствующих потоков трафика выступают периферийные серверы CDN, а в качестве ис-

точников запросов и получателей контента – серверы P2P-сетей, исток  $s_k^1$  и сток  $t_k^1$  данной сети ограничены множествами  $N^{CDN}$  и  $N^{P2P}$ ,  $s_k^1 \in N^{CDN}$ ,  $t_k^1 \in N^{P2P}$ , где индекс k указывает на номер полюсной пары (индекс запроса) в рамках множества K,  $k \in K$ , l – на запрашиваемый контент,  $l \in L$ .

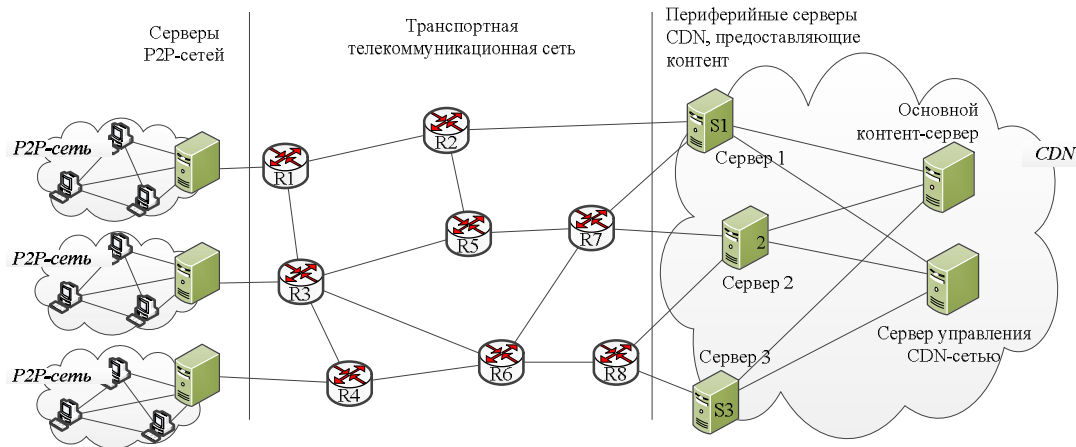


Рис. 1. Пример гибридной сети доставки контента с учетом телекоммуникационного компонента

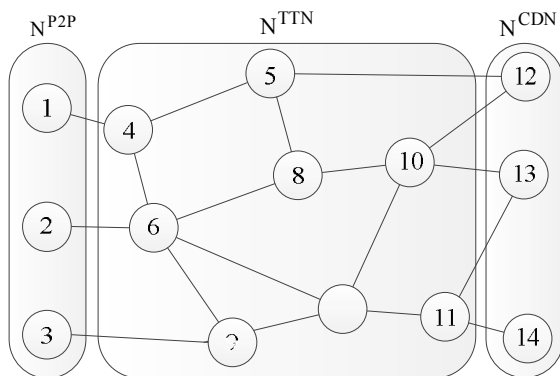


Рис. 2. Граф, отображающий структуру гибридной сети доставки контента

Задача управления ресурсами HCDN в соответствии со сформулированными выше требованиями состоит в распределении ресурсов двух типов: канальных ресурсов трактов передач транспортной телекоммуникационной сети и вычислительных ресурсов серверов. Поскольку принята идеология взаимодействия P2P-сети и CDN по принципу CAP, предполагается, что запросы от клиентов поступают сначала на индекс-сервер P2P-сети и обслуживаются в соответствии с пиринговым протоколом, например, BitTorrent, eDonkey или другими подобными. Однако, если запрашиваемый контент не может быть предоставлен P2P-сетью, запрос адресуется к CDN-серверам, причем в качестве источника запроса уже выступает сервер P2P-сети (рис. 1). Тогда задача управления представляет собой совокупность следующих подзадач:

- подзадача распределения контента, состоящая в определении объектов (файлов, содержащих контент), которые будут реплицированы на том или ином периферийном сервере;
- подзадача маршрутизации запросов, состоящая в выборе наилучшего в смысле заранее определенных метрик периферийного сервера, на который этот запрос перенаправляется и который выступает в качестве источника для загрузки запрашиваемого контента;
- подзадача маршрутизации потоков пакетов на сетевой уровне ТКС, обеспечивающая доставку контента клиенту (от сервера-источника контента до P2P-сервера, через который поступил запрос).

Тесная взаимосвязь перечисленных подзадач не позволяет рассматривать их по-отдельности, а напротив, нацеливает на совместное их решение в рамках единой математической модели, что обеспечит высокую согласованность результирующих управленческих решений.

Таким образом, содержание решаемой задачи определяет следующие три типа управляющих переменных. С решением задачи распределения контента будут ассоциированы переменные  $z_g^l, l \in L, g \in N^{CDN}$ ,

$$z_g^l = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-й объект доступен} \\ & \text{на } g\text{-м сервере,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

По своей сути переменные (1) отвечают за хранение l-го объекта (контента) на g-м сервере.

С решением второй из перечисленных подзадач свяжем переменные  $y_g^{kl}$ , указывающие на выбор  $g$ -го сервера в качестве источника  $l$ -го объекта (контента) для обслуживания  $k$ -го запроса.

Поскольку предполагается, что запросы поступают к серверам CDN от серверов нижележащих P2P-подсетей и фактически представляют собой не единичные, а агрегированные запросы, целесообразно обращаться к нескольким CDN-серверам одновременно. Тогда переменные  $y_g^{kl}$  будут указывать на долю контента, загружаемого с  $g$ -го CDN-сервера, т.е.

$$0 \leq y_g^{kl} \leq 1, k \in K, l \in L, g \in N^{CDN}. \quad (2)$$

Решение традиционной задачи маршрутизации в транспортной телекоммуникационной сети, отвечающей за доставку потока пакетов в процессе обслуживания  $k$ -го запроса по доставке  $l$ -го контента, формализуем в виде маршрутных переменных  $x_{ij}^{kl}$ . Переменные  $x_{ij}^{kl}$  указывают на долю потока пакетов, связанного с доставкой контента, передаваемого по тракту передачи  $(i, j)$  от  $i$ -го маршрутизатора к  $j$ -му,

$$0 \leq x_{ij}^{kl} \leq 1, i, j \in N^{TTN}, k \in K, l \in L. \quad (3)$$

Взаимосвязь введенных переменных определяется законом сохранения потока в маршрутизаторах ТКС и серверах P2P-сетей, выступающих в роли получателей контента, т.е для  $i$ -й вершины графа  $G$ ,  $i \in N^{P2P} \cup N^{TTN}$ , должно выполняться:

$$\sum_{j \in N^{P2P} \cup N^{TTN}} x_{ij}^{kl} - \sum_{j \in N^{TTN}} x_{ji}^{kl} - \sum_{g \in N^{CDN}} z_g^l x_{gi}^{kl} = \begin{cases} 0, & \text{если } i \neq s_k^l, t_k^l, \\ -1, & \text{если } i = t_k^l. \end{cases} \quad (4)$$

Для вершин графа  $g \in N^{CDN}$ , моделирующих серверы CDN, условие сохранения потока принимает вид:

$$\sum_{j \in N^{P2P} \cup N^{TTN}} z_g^l x_{gj}^{kl} = y_g^{kl}. \quad (5)$$

Поскольку предусматривается загрузка одновременно от нескольких CDN-серверов, целостность запрашиваемого контента обеспечивается за счет выполнения условия

$$\sum_{g \in N^{CDN}} z_g^l y_g^{kl} = 1. \quad (6)$$

В связи с ограниченными объемами сетевых и вычислительных ресурсов, на введенные переменные накладываются ограничения вида:

$$\sum_k \sum_l r^{kl} x_{ij}^{kl} \leq c_{ij}, \quad (7)$$

$$\sum_k z_g^l y_g^{kl} \leq S_g^l, \quad (8)$$

где  $r^{kl}$  – интенсивность потока пакетов, создаваемого при передаче  $l$ -го контента в рамках  $k$ -го запроса;  $c_{ij}$  – пропускная способность тракта передачи  $(i, j)$  в ТКС;  $S_g^l$  – максимальное число сессий  $l$ -го типа, которое способен обслужить  $g$ -й сервер.

Таким образом, переменные (1) – (3) и накладываемые на них ограничения (4) – (8) определяют порядок использования вычислительных и сетевых ресурсов, процесс формирования управляющего решения относительно которого может быть формализован в виде оптимизационной задачи.

### Метод комплексного управления ресурсами в HCDN

При выборе целевой функции в рамках оптимизационной постановки задачи по управлению ресурсами HCDN следует исходить из следующих факторов. Ресурсы сети доставки контента, как вычислительные, так и каналные являются ограниченными (7) – (8), а потому целесообразно стремиться к их рациональному (экономному) использованию, что в теории оптимального управления формализуется в виде стоимостной функции. Например, в качестве целевой функции может выступать линейная стоимостная функция вида

$$W = Q_x \bar{x} + Q_y \bar{y} + Q_z \bar{z} \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  – векторы, объединяющие в себе переменные  $x_{ij}^{kl}$ ,  $y_g^{kl}$  и  $z_g^l$  соответственно;  $Q_x$  – вектор весовых коэффициентов, определяющие стоимость использования сетевых ресурсов;  $Q_y$ ,  $Q_z$  – векторы весовых коэффициентов, определяющие стоимость использования вычислительных ресурсов для обслуживания запросов и для хранения контента соответственно.

В то же время достаточно распространенным критерием распределения как сетевых ресурсов в рамках решения задачи маршрутизации в ТКС [5], так и серверных ресурсов в ходе маршрутизации запросов в традиционных CDN [3, 4], является сбалансированность их использования. В первую очередь это обеспечивает снижение средней задержки доставки контента, а также предотвращает локальные перегрузки сетевых элементов, и тем самым способствует повышению эффективности системы в целом. С целью обеспечения сбалансированного использования сетевых и вычислительных ресурсов введем пороги их использования:  $\alpha$  – управляемый порог использования каналных ресурсов транс-

портной телекоммуникационной сети,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ;  $\beta$  – управляемый порог использования вычислительных ресурсов всех серверов CDN,  $0 \leq \beta \leq 1$ . Тогда ограничения (7) и (8) принимают вид:

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} x_{ij}^{kl} \leq \alpha \leq 1, \quad (10)$$

$$\frac{\sum_{k \in K} y_g^{kl}}{S_g^l} \leq \beta \leq 1. \quad (11)$$

В результате одновременно сбалансированное использование всех ресурсов (и сетевых ( $\alpha$ ), и вычислительных ( $\beta$ )) будет достигаться при целевой функции вида

$$W = Q_\alpha \alpha + Q_\beta \beta \rightarrow \min, \quad (12)$$

где  $Q_\alpha$ ,  $Q_\beta$  – весовые коэффициенты, определяющие важность каждого слагаемого.

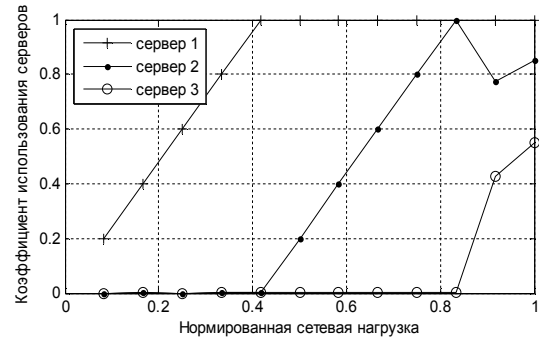
В случае (12), как и в случае (9), задача управления ресурсами в HCDN формализуется как оптимизационная задача смешанного линейного программирования, для решения которой известен ряд методов. Однако, несмотря на принадлежность моделей (1) – (9) и (1) – (8), (10) – (12) к одному классу оптимизационных задач, они определяют разные стратегии управления ресурсами HCDN. С целью анализа предложенных моделей было проведено моделирование на ряде структур, одна из которых представлена на рис. 2. Предполагалось, что запросы поступают в сеть через маршрутизатор R1 (вершина 1 в соответствующем графе), пропускные способности всех трактов передачи ТКС равны между собой и составляют 1200 Мбит/с. Максимальная интенсивность передачи контента от каждого из серверов CDN (их производительность) была ограничена величиной 1000 Мбит/с. В итоге пропускная способность системы в целом определяется структурой телекоммуникационного компонента и равна 2400 Мбит/с. Для упрощения предположим, что все запросы адресованы к одному и тому же типу контента. Интерес представляет поведение различных моделей в условиях роста числа запросов, и соответственно, увеличения сетевой нагрузки, создаваемой при передаче контента в ответ на эти запросы. Сопоставление будет производиться по следующим показателям:

- коэффициент использования серверных ресурсов  $R_{uage}^{server}$ , рассчитываемый как отношение интенсивности передачи контента данным сервером к его производительности;

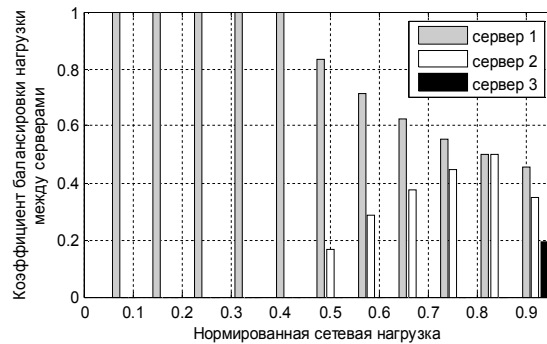
- коэффициент использования канальных ресурсов ТКС  $R_{uage}^{link}$ , рассчитываемый для тракта передачи (i, j) как  $\sum_k \sum_l x_{ij}^{kl}$ ;

- коэффициент балансировки нагрузки между серверами  $R_{lbal}^{server}$ , рассчитываемый как доля запросов, обслуживаемых каждым из серверов.

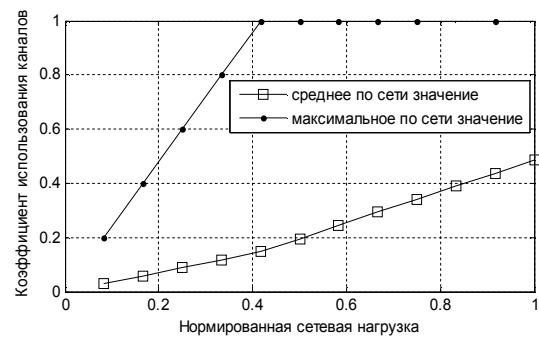
Как показано на рис. 3, решение задачи управления ресурсами в соответствии со стоимостным критерием (9) обеспечивает последовательное «включение» серверов. В случае низкой пользовательской активности все поступающие к CDN запросы обрабатываются первым сервером, и соответственно лишь на этот периферийный сервер загружен запрашиваемый контент.



а



б



в

Рис. 3. Показатели использования ресурсов HCDN в условиях критерия (9)

Первоочередной выбор сервера S1 в моделируемой структуре (рис. 1 и 2) связан со структурой путей доставки контента к маршрутизатору R1: путь между S1 и R1 (путь 1 на рис. 4) обеспечивает минимум суммы  $Q_x \bar{x}$  и  $Q_y \bar{y}$  в целевой функции (9). При достижении сервером S1 своей производитель-

ности происходит «добавление» в систему сервера S2, на который дополнительно из основного сервера реплицируется контент. Теперь новые запросы преадресовываются на сервер S2, при этом сервер S1 продолжает работать на максимуме своей пропускной способности. После «добавления» в систему сервера S3 в случае дальнейшего роста сетевой нагрузки между серверами S2 и S3 происходит перераспределение запросов: хотя первый сервер продолжает работать с единичным коэффициентом использования (рис. 3, а), часть запросов, ранее обслуживаемых вторым сервером, перенаправляется на сервер S3. Это объясняется равенством путей доставки контента от серверов S2 и S3 (рис. 4). Таким образом, решение по управлению ресурсами сети доставки контента в рамках задачи (1) – (9) ориентировано, прежде всего, на задействование минимального количества серверов, «добавляя» их в систему при необходимости. При этом наблюдается низкая сбалансированность использования канальных ресурсов ТКС и серверных ресурсов (рис. 3, б, в), балансировка которых осуществляется лишь в случае равенства путей доставки контента.

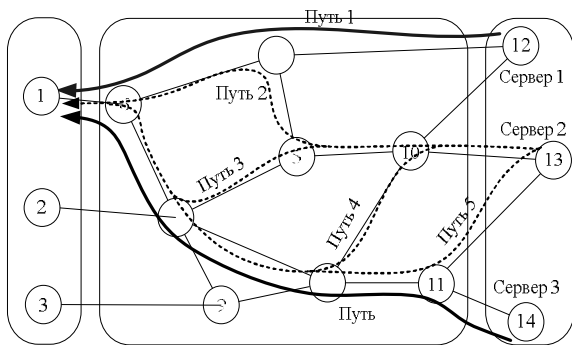
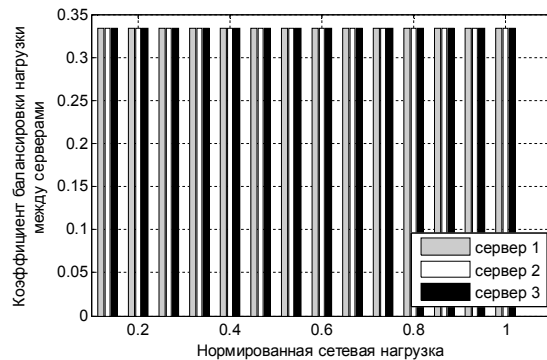


Рис. 4. Совокупность путей в моделируемой CDN

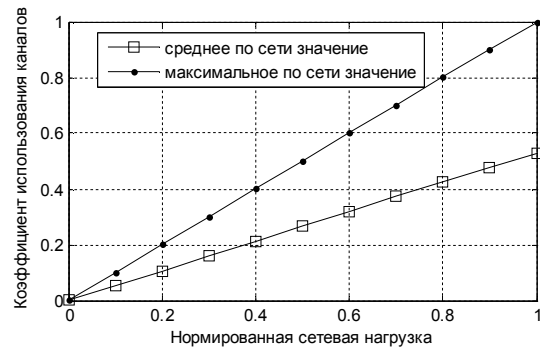
В рамках модели (1) – (8), (10) – (12), напротив, управляющее решение ориентировано на равномерное использование всех типов ресурсов без учета при этом стоимостного фактора (рис. 5). Закономерно наблюдать в этом случае задействование сразу всех трех серверов даже при низкой интенсивности поступления в сеть запросов, нагрузка между которыми делится в равных пропорциях (рис. 5, а). Использование канальных ресурсов (рис. 5, б) по сравнению с ранее описанным стоимостным подходом (рис. 3, в) является более сбалансированным, что способствует более высокому качеству обслуживания запросов.

Качество обслуживания запросов является интегральной характеристикой, включающей в себя скоростные, временные и надежность показатели. В сетях доставки контента принятие запроса к обслуживанию означает гарантированную скорость доставки соответствующего контента, однако вели-

чина претерпеваемой при этом задержки доставки не регулируется. В этой связи произведем оценку средних задержек, обеспечиваемых при доставке контента согласно различным принципам принятия управляющего решения.



а



б

Рис. 5. Показатели использования ресурсов HCDN в условиях критерия (12)

Например, используя результаты теории массового обслуживания и представляя каждый тракт передачи сети в виде модели M/M/1, имеем следующие зависимости (рис. 6, 7). Здесь отражены средние задержки доставки контента вдоль каждого из используемых с этой целью маршрутов (рис. 4). Полученные результаты подтверждают целесообразность сбалансированного использования ресурсов всех видов как необходимого условия обеспечения высокого качества обслуживания запросов пользователей.

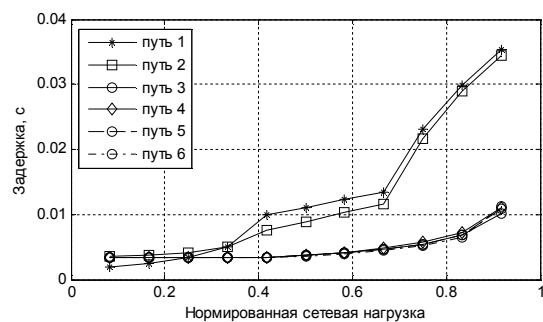


Рис. 6. Задержка доставки контента вдоль различных путей в условиях критерия (9)

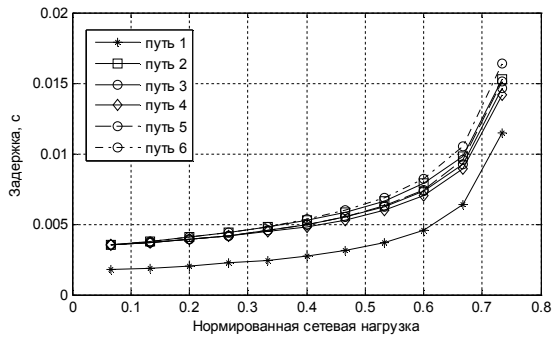


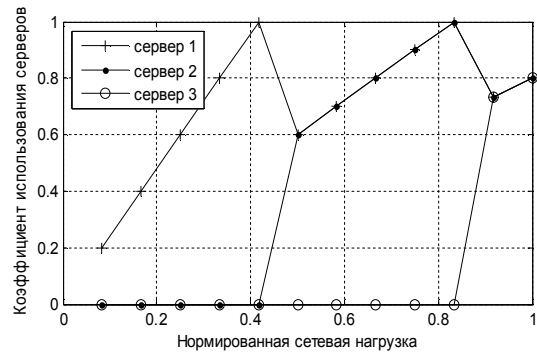
Рис. 7. Задержка доставки контента вдоль различных путей в условиях критерия (12)

Тогда на основании полученных результатов моделирования можно предложить комплексное управление ресурсами HCDN путем совместного (комплексного) применения принципов управления (9) и (12) в рамках трехуровневого иерархического метода.

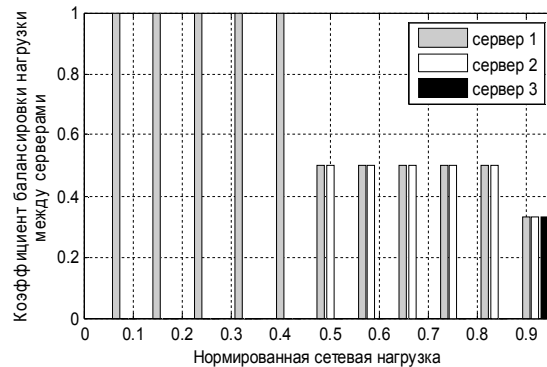
Уровень 1 (нижний) относится к управлению ресурсами P2P-подсетей. В случае, если запросы пользователей не могут быть обслужены в рамках пиринговой сети, например, по причине отсутствия должного числа пиров, обеспечивающих требуемое качество доставки контента, сервер P2P-подсети формирует запрос к вышестоящим CDN-серверам. Уровень 2 ассоциирован с задачей маршрутизации запросов в CDN, связанной с минимизацией (12) по переменным  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  при заданном распределении контента, т.е. при фиксированных  $\bar{z} = \bar{z}^*$ . Если в рамках текущего распределения контента  $\bar{z} = \bar{z}^*$  не обеспечивается заданное качество обслуживания, например, уровень отказов в обслуживании превышает заданный порог, инициируется работа третьего уровня. Верхний третий уровень решает задачу распределения контента путем решения оптимизационной задачи (9) при ограничениях (1) – (8) по переменным  $\bar{z}$ ,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , однако рассчитываемые здесь векторы  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  не будут реализованы на втором уровне. Результатом работы третьего уровня управления является порядок репликации контента на периферийных серверах, представленный в виде вектора  $\bar{z}$ . В целом период перерасчета переменных  $\bar{z}$  на третьем уровне превосходит в несколько раз период перерасчета переменных второго уровня.

Результаты моделирования в соответствии с описанным трехуровневым методом комплексного управления отражены на рис. 8 – 10.

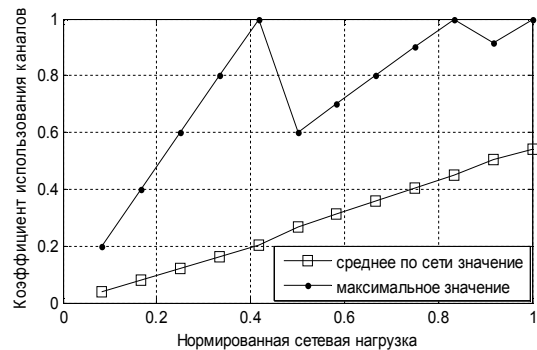
Использование стоимостной целевой функции на верхнем третьем уровне управления обеспечивает последовательное задействование серверов (рис. 8, а). Однако теперь ресурсы всех серверов, обладающих требуемым контентом, используются в равной мере (рис. 8, б).



а



б



в

Рис. 8. Показатели использования ресурсов HCDN в условиях комплексного подхода

Кроме того, исключается долговременная предельная (на единичном уровне) загруженность трактов передачи телекоммуникационной сети (рис. 8, в). Это обеспечивает среднюю задержку доставки контента практически на уровне, наблюдаемом в рамках модели (1) – (8), (10) – (12) (рис. 9 и 10).

За счет реализации комплексного управления при той же стоимости размещения контента на различных серверах, и лишь за счет применения принципа балансировки при определении порядка использования серверных и канальных ресурсов, достигается снижение средней задержки как минимум на 15 – 20 %, а для рассматриваемого примера выигрыш измеряется разами (рис. 10).

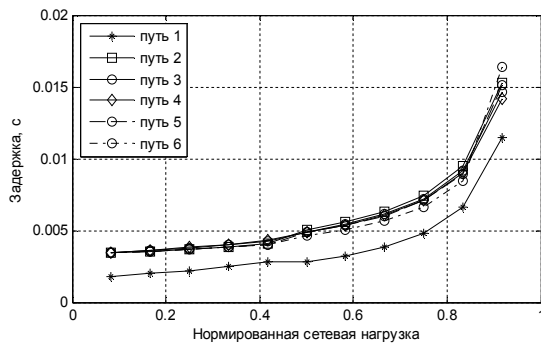


Рис. 9. Задержка доставки контента контента вдоль различных путей в условиях комплексного решения

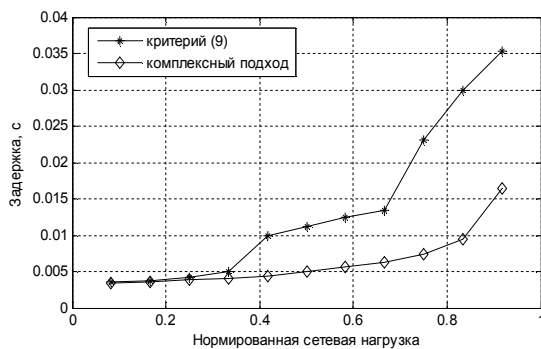


Рис. 10. Результирующие многопутевые задержки доставки контента

## Выводы

Таким образом, на основании количественного анализа различных математических моделей сетей доставки контента и, соответственно, различных принципов распределения их ресурсов был предложен иерархический трехуровневый метод комплекс-

ного управления ресурсами HCDN. Метод позволяет совместно решить ряд задач: распределения контента, маршрутизации запросов и маршрутизации в ТКС, однако за счет иерархического управления удается избежать чрезмерного усложнения процесса управления, а за счет комбинации различных принципов удается снизить стоимость размещения контента на различных серверах и при этом обеспечить высокое качество обслуживания запросов.

## Список литературы

1. Zhi Hui Lu. An Analysis and Comparison of CDN-P2P-hybrid Content Delivery System and Model / Zhi Hui Lu, Ye Wang, Yang Richard Yang // *Journal of Communications*. – 2012. – Vol. 7, N. 3. – P. 232-245.
2. Efficient large-scale content distribution with combination of CDN and P2P networks / [Hai Jiang, Jun Li, Zhongcheng Li, Xiangyu Bai] // *International Journal of Hybrid Informational technology*. – 2009. – Vol. 2, N. 2. – P. 13-24.
3. Content Delivery Networks / Buaya, Rajkumar; Pathan, Mukaddim; Vakali, Athena (Eds.). – Springer, 2008. – 418 p. (Series: Lecture Notes in Electrical Engineering).
4. Евсеева О.Ю. Математическая модель маршрутизации запросов в сетях доставки контента / О.Ю. Евсеева, М.Б. Кадер // *Системи обробки інформації*. – X.: ХУПС, 2012. – Вип. 9 (107). – С. 165-170.
5. Лемешко А.В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко [Электронный ресурс] // *Проблеми телекомунікацій*. – 2012. – № 1 (6). – С. 12-29. – Режим доступа к журналу: [http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121\\_lemeshko\\_multipath.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf).

Поступила в редколлегию 7.08.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Лемешко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## БАГАТОРІВНЕВИЙ ІЄРАРХІЧНИЙ МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В ГІБРИДНИХ МЕРЕЖАХ ДОСТАВКИ КОНТЕНТУ

О.Ю. Євсєєва, Мохаммед Б. Кадер

На підставі кількісних результатів аналізу різних математичних моделей і, відповідно, різних принципів розподілу ресурсів був запропонований ієрархичний трирівневий метод комплексного управління ресурсами гібридної мережі доставки контенту. Метод орієнтований на спільне розв'язання задач розподілу контенту, маршрутизації запитів і маршрутизації в телекомунікаційній мережі. Проте за рахунок ієрархичного управління вдається уникнути надмірного ускладнення процесу управління, а за рахунок комбінації різних принципів вдається знизити вартість розміщення контенту на різних серверах і при цьому забезпечити високу якість обслуговування запитів.

**Ключові слова:** гібридні мережі доставки контенту, математична модель, ієрархичне управління ресурсами.

## MULTI-LEVEL HIERARCHICAL METHOD FOR COMPLEX RESOURCE MANAGEMENT IN HYBRID CONTENT DELIVERY NETWORK

O.Yu. Yevsyeyeva, Mohammed B. Khader

Based on the numerical analysis of various mathematical models and, consequently, different principles of resource allocation a new three-layer hierarchical method for complex resource management in hybrid content delivery network was proposed. The method is focused on problems of content allocation, request routing and routing in telecommunication network which are solved jointly. Due to the hierarchical approach the method allows to avoid overly complicating the management process, but due to a combination of various control principles it is possible to reduce the cost of content storage on different servers and to achieve high quality of service at same time.

**Keywords:** hybrid content delivery network, a mathematical model, hierarchical resource management.