

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АДАПТАЦИИ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВ ДАННЫХ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА RRAP

САЕНКО В.И., СНУРНИКОВ О.М.

Рассматриваются вопросы исследования модифицированного метода адаптивной передачи потока данных RRAP для компьютерных сетей с участками типа «узкое горло». Приводятся результаты имитационных исследований, предлагаются наилучшие значения настроечных параметров. Исследования проводились в научно-исследовательской лаборатории «Менеджмент компьютерных сетей» (NM Lab) в ХНУРЭ.

## 1. Описание проблемы и анализ известных результатов исследований

Протоколы и методы передачи потоков аудио- и видеоданных должны обеспечивать как возможность максимального использования доступных ресурсов компьютерной сети (при этом не допуская перегрузок сети), так и справедливость распределения этих ресурсов между потоками. Наибольшее распространение получили методы адаптивной передачи потоков данных [1-5]. К их достоинствам относится способность подстраивать характеристики передачи к изменению свойств передающей среды. К недостаткам можно отнести временные задержки при определении состояния сети и нестабильность управления скоростью передачи потока данных при адаптации к изменениям загрузки сети [1, 8, 9].

RRAP является специализированным адаптивным протоколом контроля перегрузок сети при трансляции аудио- и видеоданных [3, 6]. Особенностями данного протокола являются использование уровня потерь пакетов в канале передачи данных для оценки состояния сети [3, 5] и применение алгоритма аддитивного наращивания и мультипликативного сброса скорости передачи (AIMD, Additive Increase Multiplicative Decrease). В работе [1] было показано, что в условиях одновременной передачи нескольких потоков через общее «узкое горло» сети возникает эффект взаимной синхронизации потоков и резко понижается качество обслуживания. Там же был предложен модифицированный метод RRAP и на примерах показано его преимущество.

Нерассмотренными остались вопросы исследования поведения предложенного метода в различных режимах его использования, а также вопросы поиска оптимальных режимов такого рода.

*Цель исследования* – выявление наилучших значений настроечных параметров для основанных на RRAP [1] методов адаптивного управления потоками данных в компьютерной сети.

## 2. Постановка задачи и описание объекта исследования

*Описание среды существования процесса передачи потоковых данных.* Пусть задана многосегментная компьютерная сеть с неоднородными (с точки зрения полосы пропускания и задержек) участками передачи данных. В этой сети осуществляется одноадресная передача одного или более потоков мультимедиа-данных. Каждый из передаваемых потоков проходит через множество сегментов от узла-источника до узла-получателя, на которых функционируют, соответственно, приложение-источник и приложение-получатель. На пути потока может находиться канал связи с некоторой минимальной доступной пропускной способностью, который считается «узким горлом» для данного потока. Пусть процесс передачи осуществляется с использованием протокола RRAP [1]. Выделяется несколько процессов выполнения (рис.1): передача данных (1), обновление скорости передачи (3), получение ACK (2), внесение аддитивной стохастической составляющей (4).

*Описание метода адаптации RRAP* [1]. Процесс передачи данных представляет собой поочередную передачу пакетов фиксированного размера с периодом, значение которого обозначено как  $IPG_i$  (Inter-Packet Gap, межпакетный интервал).

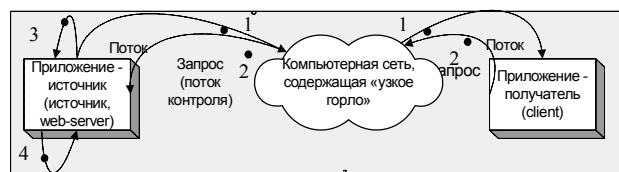


Рис. 1. Схема передачи сообщений и данных протокола RRAP

Для режимов функционирования, при которых производится одновременная передача нескольких потоков через общее «узкое горло» в сети, наблюдается эффект взаимной синхронизации скорости передачи [1], который приводит к увеличению длительности переходного процесса  $T^*$  для каждого из потоков (рис. 2).

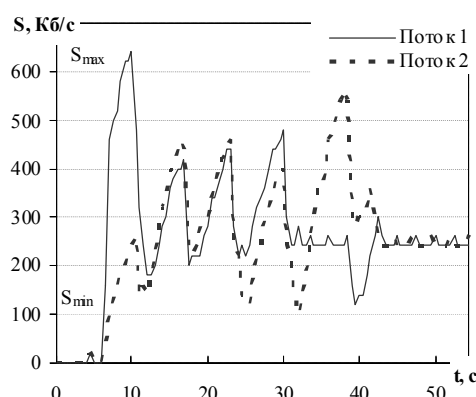


Рис. 2. Диаграмма изменения скорости передачи данных

Как видно из рис.2, в моделируемых условиях каждый из потоков RRAP изменяет скорость передачи данных. Изменение скорости каждого из потоков на начальном этапе имеет колебательный характер, с длительностью переходного процесса  $T^*$  примерно 25 секунд (см. рис. 2). В течение этого времени размах колебаний (см. значения  $S^{\min}$  и  $S^{\max}$ , рис. 2) является значительным относительно установившегося режима. Такой характер передачи приводит к снижению качества работы приложения, использующего протокол RRAP.

Скорость передачи на любом  $i$ -м шаге определяется

(рис.3) как  $S_i = \frac{\text{PacketSize}}{\text{IPG}_i}$ .

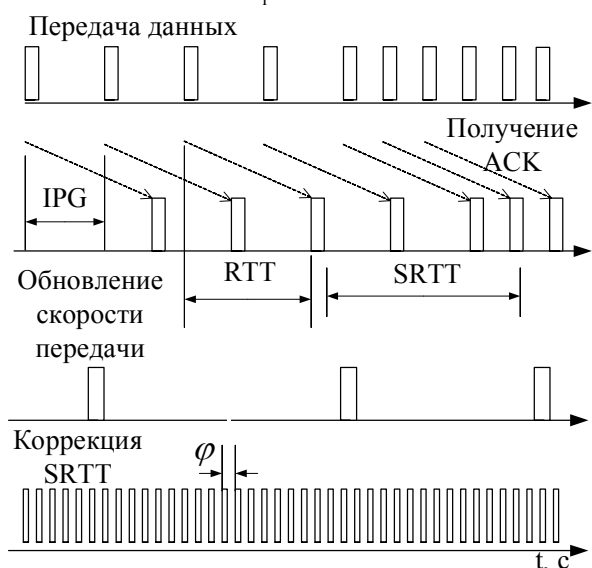


Рис. 3. Временная диаграмма выполнения процессов RRAP

Поскольку значение PacketSize является неизменным в течение сеанса связи, для изменения скорости передачи данных изменяется значение

$$\text{IPG}_{i+1} = \frac{\text{IPG}_i * \text{SRTT}_i}{\text{IPG}_i + \text{SRTT}_i} \quad (1)$$

Обновление значения SRTT осуществляется в соответствии с методом Джексона/Карела [10]:

$$\text{SRTT}_j = \omega * \text{SRTT}_{j-1} + (1 - \omega) * \text{RTT}_j, \quad (2)$$

где  $\text{RTT}_j$  – значение RTT (Round Trip Time) на текущем шаге, определяемое как  $\text{RTT}_j = t_j^{\text{ACK}} - t_j$ ;  $t_j^{\text{ACK}}$  – время получения квитанции;  $t_j$  – время отправки пакета, для которого была получена квитанция;  $\omega$  – параметр, определяющий степень сглаживания оценки RTT для устранения влияния скачкообразных кратковременных перегрузок сети.

Для устранения корреляции колебаний скорости передачи (см. рис. 2) в [1] было предложено вносить аддитивную стохастическую составляющую:

$$\text{SRTT}_j^* = \text{SRTT}_j + \text{SRTT}_j * \alpha * (0.5 - \gamma) \quad (3)$$

и пересчитывать SRTT через интервал  $\varphi$ :

$$\text{SRTT}_j = (\omega * \text{SRTT}_{j-1} + (1 - \omega) \text{RTT}_{j-1}) * (1 + \alpha(0.5 - \gamma)), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – случайное значение, равномерно распределенное в интервале  $[0..1]$ ;  $\alpha$  – коэффициент, определяющий разброс значений оценки SRTT. Значение SRTT является входным параметром для управления скоростью, и корреляция между вычисляемыми значениями SRTT для каждого из потоков является причиной синхронизации колебаний.

Внесение составляющей выполняется с фиксированным интервалом времени  $\varphi$ , таким, что

$$\varphi \ll \min(\min(\text{IPG}), \min(\text{RTT})). \quad (5)$$

В итоге, если перегрузки сети не обнаружены, происходит периодическое изменение (наращивание) значения скорости передачи данных за счет изменения межпакетного интервала. В случае обнаружения перегрузок сети происходит немедленное снижение скорости передачи данных  $S_{i+1} = \beta S_i$ , где  $0 < \beta < 1$  – коэффициент сброса скорости при перегрузке. Сигналом о возникновении перегрузок сети для RRAP является факт наличия потерь пакетов при передаче потока.

Анализ, проведенный в [1], показал, что основными параметрами, влияющими на свойства самосинхронизации алгоритма, являются  $\alpha$ ,  $\varphi$ . Будем называть эти параметры – *настроечными*. Дополнительное влияние на характеристики работы метода оказывают переменные  $\beta$ ,  $\omega$ .

**Постановка задачи.** В соответствии с изложенным выше формулируется задача:

– выявить влияние параметров  $\alpha$ ,  $\varphi$  на основные свойства алгоритма управления скоростью передачи данных RRAP и найти наилучшие условия работы метода RRAP при изменении  $\alpha$ ,  $\varphi$ ,  $\beta$ ,  $\omega$ .

**Объектом исследований** является модифицированный метод передачи потоков данных на основе протокола RRAP.

### 3. Метод исследований

Для рассмотрения свойств алгоритма RRAP предлагается сформировать некоторый *обобщенный показатель качества*. Предлагается для показателя качества работы алгоритма рассматривать значение интервала  $T^*$ . Далее полагаем, что меньшее значение интервала  $T^*$  соответствует более высокому качеству работы протокола. При больших значениях  $T^*$  наблюдается запаздывание передачи данных, неравномерность передачи потока и кратковременные перегрузки каналов. Это сказывается на использовании ресурсов сети в целом и при значительном числе передаваемых потоков может приводить к очень ощутимым потерям качества сервисов.

Результаты исследований, приведенные в [1], показали, что величина интервала  $T^*$  зависит от параметров самого метода  $\alpha$ ,  $\varphi$ , т.е. существует некоторая  $T^* = F_1(\alpha, \varphi)$ .

Следовательно, критерий качества работы соответствующего алгоритма (реализации метода) можно записать как

$$T^* \rightarrow \min, T^* = F_1(\alpha, \varphi). \quad (6)$$

Исследование поведения алгоритмов управления потоками проводилось с использованием системы имитационного моделирования пакетных сетей ns-2 [8] в рамках специально разработанной методики.

Для проведения моделирования использовалась топология, взятая из [1] (рис. 4).

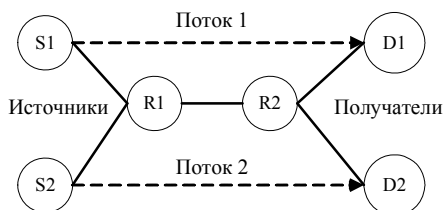


Рис. 4. Схема топологической структуры моделируемого участка сети

Пусть есть компьютерная сеть, заданная узлами (S1, S2, R1, R2, D1, D2) и каналами передачи данных. Пусть в сети имеется участок с «узким горлом» (R1, R2). В сети имеются серверы вещания – источники (S1, S2) и станции-получатели (D1, D2). Пусть существуют два потока (поток 1, поток 2). Каналы связи имеют следующую пропускную способность  $C(S1, R1) = C(S2, R1) = C(D1, R2) = C(D2, R2) = 1,5$  Мб/с. Полоса пропускания «узкого места» сети составляет 0,5 Мб/с,  $C(R1, R2) = 0,5$  Мб/с. Для каналов связи, не являющихся узкими местами сети, полоса пропускания общих каналов значительно (в 3 раза) превышает полосу пропускания «узкого места». Задержки в каналах равны  $d(S1, R1) = d(S2, R1) = d(R2, D1) = d(R2, D2) = 10$  ms,  $d(R1, R2) = 150$  ms. Длина очереди на промежуточных (маршрутизирующих) узлах R1 и R2 составляет 32 пакета.

Производилось моделирование передачи двух потоков RRAP в течение 100 секунд, передача обоих потоков начиналась одновременно на 4-й секунде от момента начала моделирования и завершалась по завершению моделирования. Период снятия измеряемых значений составлял S секунды.

В процессе моделирования варьировались параметры  $\alpha$  и  $\varphi$ . Параметр  $\alpha$  принимал значения от 0,05 до 0,95 с шагом 0,05. Параметр  $\varphi$  принимал значения от 0,0005 до 0,005 с шагом 0,0005.

#### 4. Результаты исследований

Исследование влияния изменения  $\alpha$  на характеристики качества передачи данных. На рис. 5 представлены результаты исследований  $T^* = F(\alpha)$  при  $\varphi \in [0.001; 0.008]$ . На рис. 6 даны результаты исследо-

ваний  $T^* = F(\varphi)$  при  $\alpha \in [0.3; 0.7]$ , а на рис. 7 – результаты исследований  $T^* = F(\alpha, \varphi)$ .

Как видно из рис. 5, рост значения  $\alpha$  до 0,4 приводит к значительному уменьшению времени колебаний  $T^*$ . Очевидно, что область наилучших значений  $\alpha \in [0.4; 0.95]$ . Сравнивая графики рис. 5 при различных  $\varphi$ , можно сделать вывод, что влияние  $\varphi$  при этом невелико.

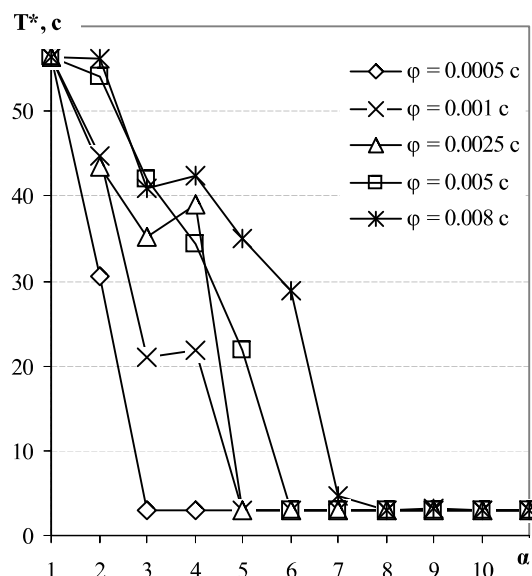


Рис. 5. Результаты исследований  $T^* = F(\alpha)$  при  $\varphi \in [0.0001; 0.008]$  (аппроксимация)

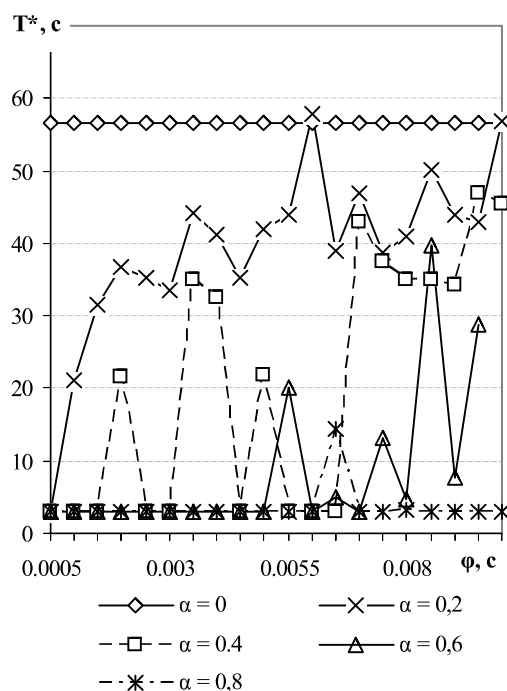


Рис. 6. Результаты исследований  $T^* = F(\alpha)$  при  $\varphi \in [0.0001; 0.01]$  (аппроксимация)

Исследование влияния  $\varphi$  на характеристики качества передачи данных. Из рис.6 видно, что влияние  $\varphi$  значимо только при значениях  $\alpha$ , начиная с 0,4. При этом область наилучших значений интервала  $T^*$  соответствует  $\varphi < 0.005$ .

Сглаженная поверхность представления функции  $T^* = F(\alpha, \varphi)$  приведена на рис. 7.

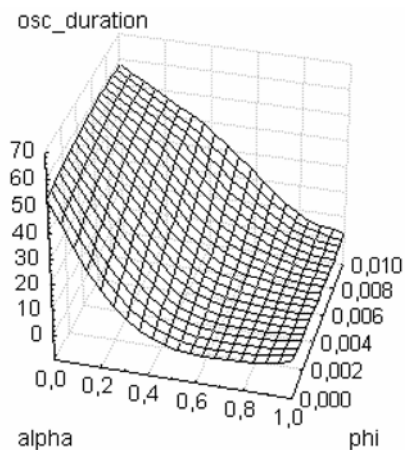


Рис. 7. График изменения длительности переходного процесса  $T^* = F(\alpha, \varphi)$

Анализируя зависимость  $T^* = F(\alpha, \varphi)$  из рис. 7, можно утверждать, что область наилучших значений лежит в границах  $0.0005 < \varphi < 0.005$  и  $0.4 < \alpha < 0.6$ .

Можно выделить область  $\alpha \in [0.4; 0.6]$ , в которой получаем наилучшие значения для интервала  $T^*$ . Из рис. 7 также видно, что изменение  $\varphi$  незначительно влияет на параметр  $T^*$ . Во всяком случае, при значениях  $0.0005 < \varphi < 0.005$  мы имеем наилучшие значения  $T^*$ . При увеличении  $\varphi$  эффект взаимной синхронизации начинает проявляться при все более высоких значениях  $\alpha$ . Уменьшение  $\varphi$  создает большую вычислительную нагрузку на источник, заставляя пересчитывать основные характеристики передачи данных через интервалы  $\varphi$ . Таким образом, существует нижняя граница для  $\varphi$ , обусловленная вычислительной мощностью сервера. Наши рекомендации –  $\alpha \in [0.4; 0.9]$ ,  $\varphi \in [0.0005; 0.005]$ .

Динамика изменения скорости передачи потоков (при значении  $\alpha = 0,45$ ) показана на рис. 8.

Исследование влияния  $\beta, \omega$  на характеристики качества передачи данных. Настраиваемые параметры  $\beta, \omega$  являются фактически параметрами метода Джекобсона-Карела [10]. Параметр  $\beta$  используется для уменьшения скорости при обнаружении перегрузки, а параметр  $\omega$  определяет степень сглаживания измеряемых значений RTT.

Как показывают результаты проведенного имитационного моделирования, варьирование значения  $\omega$  оказывает некоторое влияние на рассматриваемые свой-

ства алгоритма. При уменьшении значений этого параметра алгоритм более чувствителен к вариациям измеряемых значений  $RTT_i$  (см. (4)) и менее чувствителен к изменениям SRTT. В результате реакция на изменения в загрузке сети несколько ускоряется; в то же время возрастает влияние скачкообразных перегрузок на качество работы алгоритма. При увеличении значений параметра  $\omega$  алгоритм более чувствителен к изменениям SRTT и менее чувствителен к изменениям RTT. Это проявляется в том, что чувствительность алгоритма к влиянию кратковременных перегрузок снижается, но, в то же время, замедляется реакция на долговременные изменения в нагрузке сети. Эти изменения не связаны со свойствами взаимной синхронизации колебаний скорости передаваемых потоков.

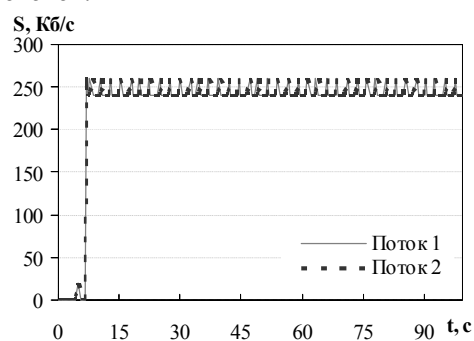


Рис. 8. Динамика изменения скорости передачи потоков RRAP для  $\alpha = 0,45$

Увеличение значения  $\beta$  приводит к уменьшению длительности колебаний. Это демонстрируют результаты имитационного моделирования RRAP и результаты, полученные другими исследователями для протокола TCP [11]. Следует отметить, что метод Джекобсона-Карела и, соответственно, коэффициенты, аналогичные  $\beta$  и  $\omega$ , используются также в наиболее распространенных на сегодняшний день реализациях протокола TCP, таких как Reno и Tahoe. Значения указанных коэффициентов, применяемые в приведенных реализациях TCP, составляют  $\beta = 0,5$  и  $\omega = 0.875$ . Соображения, на основании которых выбраны такие значения параметров для TCP, приведены в [10]. Наиболее важным фактором, вынуждающим принять в RRAP аналогичные значения параметров и избегать их варьирования, является необходимость обеспечения совместимости алгоритма с доминирующими в современных сетях механизмами управления скоростью передачи, основанными на TCP [1]. Значения параметров  $\beta$  и  $\omega$ , отличные от  $\beta = 0,5$  и  $\omega = 0.875$ , приводят к нарушению справедливости распределения полосы пропускания между потоками RRAP и TCP [4], что противоречит исходным предпосылкам разработки протокола, приведенным в [1,4].

Следовательно, вместо (4) имеем

$$SRTT_j = (0.875 * SRTT_{j-1} + 0.125 * RTT_{j-1}) * (1 + \alpha(0.5 - \gamma)). \quad (7)$$

## 5. Методика исследований

Методика исследований основана на построении модели в семантике ns-2, выборе топологии моделируемой компьютерной сети, выборе установочных параметров моделируемого процесса передачи данных.

На основании сказанного выше можно констатировать, что получил развитие метод исследования, состоящий в следующем:

- 1) для изучения устойчивости методов адаптивной передачи потоков к эффекту взаимной синхронизации основным характеризующим показателем качества передачи предлагается считать  $T^*$ ;
- 2) исследование нужно проводить с использованием ns-2;
- 3) топология тестовой сети строится с учетом «узкого горла» в соответствии с п.3;
- 4) анализ проводится на однофакторных зависимостях типа  $T^* = F(\varphi)$  с сечениями для значимых переменных;
- 5) окончательный результат анализируется на основании представления в виде сглаженной поверхности, например,  $T^* = F(\alpha, \varphi)$ .

*Область применения полученных результатов.* Предлагаемые результаты могут применяться для выявления областей наиболее эффективного использования протоколов управления скоростью передачи потоков мультимедиа-данных в компьютерных сетях.

## 6. Выводы

Предложены результаты исследований метода адаптивного управления передачей мультимедиа-данных в компьютерной сети RRAP.

К основным можно отнести результаты исследований метода (п.4) и методику собственно проведения исследований (п.3,5). Все результаты получены впервые.

Основные научные результаты можно представить в вербальном виде:

– впервые получены зависимости показателей качества функционирования метода передачи данных на основе протокола RRAP от настроечных параметров этого метода. Результаты получены на основании имитационных исследований и позволяют выявить область эффективного использования метода RRAP и исключить возможные потери ресурсов в сети;

– получил дальнейшее развитие метод проведения исследований алгоритмов и протоколов передачи данных. Результаты могут быть использованы для построения методик исследования в имитационном моделировании.

*Практическая ценность* полученных результатов состоит в том, что полученные зависимости могут быть использованы для выявления областей наиболее эффективного применения протоколов управления скоростью передачи потоков мультимедиа-данных в компьютерных сетях, они позволяют выявить область эффективно-

го использования метода RRAP и исключить возможные потери ресурсов в сети. Это в свою очередь способствует снижению затрат на непродуктивные потери и разбалансированность пропускной способности логических каналов при трансляции видео-потока.

Предложенный метод позволит разработать типовые методики исследований, что может помочь снизить затраты на проведение аналогичных исследовательских работ на основе имитационного моделирования.

*Сравнение с лучшими аналогами.* Полученные результаты являются продолжением исследований [1]. Эти результаты вскрыли особенности реализации процесса передачи данных при использовании RRAP. Они могут рассматриваться как дальнейшее развитие идей, высказанных в [8], позволяющих повысить эффективность использования методов в скоростных сетях. И могут рассматриваться как дополнение работ [3-5], описывающих метод RAP. В отличие от результатов [3-5], предложено детальное исследование метода и представлена новая методика проведения исследований.

*Направление дальнейших исследований.* Результаты, полученные в данной работе, касались лишь одного из аспектов улучшения работы протокола управления качеством передачи потока данных. В дальнейшем предполагается также исследовать вопросы, связанные с выявлением поведения статистических характеристик работы алгоритма.

**Литература:** 1. Саенко В.И., Снурников О.М. Модифікований метод адаптації швидкості передачі потоків даних у комп'ютерних мережах на базі протоколу RAP // Радіоелектроніка та інформатика. 2006. 2. Jehan-Francois Paris et al. A hybrid broadcasting protocol for video on demand // Multimedia Computing and Networking Conference, San Jose, CA, USA, January 1999. P. 317-326. 3. H. Shulzrinne, et al. RTP: a transport protocol for real-time applications // RFC 1889, Internet Engineering Task Force, Jan. 1996. 62 p. 4. R. Rejaie et al. RAP: An End-to-end Rate-based Congestion Control Mechanism for Realtime Streams in the Internet // IEEE Infocom'99, New York, March 1999. Vol. 3. P. 1337-1345. 5. R. Rejaie et al. Quality Adaptation for Congestion Controlled Video Playback over the Internet // Proc. of ACM SIGCOMM '99, Cambridge, Sept. 1999. P. 189-200. 6. Mohit Talwar. A Simulation Based Evaluation of RAP // Technical Report, University of Southern California, Dec. 1998. 12 p. 7. S. Bajaj et al. Improving Simulation for Network Research. // Technical Report 99-702, University of Southern California, March, 1999. 11 p. 8. Z. Wang, F. Paganini. Global Stability with Time Delay in Network Congestion Control // Proc. IEEE Conference on Decision and control, 2002. Vol. 4. P. 3632-3637. 9. J. Wang, D. Wei, S. Low. Modelling and Stability of FAST TCP // Proc. IEEE Infocom March 2005. Vol. 2. P. 938-948. 10. V. Jacobson et al. Congestion Avoidance and Control // Computer Communication Review, Aug. 1988. Vol. 18. №4. P. 314-329. 11. Yang Richard Yang, Simon S. Lam, General AIMD Congestion Control // Proc ICNP 2000, Osaka, Japan. P. 187-198.

Поступила в редколлегию 21.11.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Самойленко Н.И.

**Саенко Владимир Иванович**, канд. техн. наук, доц., проф. кафедры информационных управляющих систем ХНУ-РЭ. Научные интересы: менеджмент компьютерных сетей. Увлечения и хобби: садоводство. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14.

**Снурников Олег Михайлович**, аспирант кафедры информационных управляющих систем ХНУРЭ. Научные интересы: методы и технологии управления потоками в компьютерных сетях. Увлечения и хобби: домашний ремонт. Адрес: Украина, 61166. Харьков, просп. Ленина, 14.