



УДК 681.51

© 2007 г. **С.С. Охотников**
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТСП СЕССИЙ МАРШРУТИЗАТОРОМ RED

Рассматривается задача стабилизации механизма формирования окна ТСП, обслуживаемого маршрутизатором с дисциплиной управления очередью RED на основе использования нелинейной модели системы с запаздыванием по управлению. Показано, что введение упругого звена в основной контур управления позволяет расширить область устойчивости системы по сравнению с системой, использующей ПИ-регулятор.

Введение

Проблема обеспечения качества обслуживания в сетях, работающих на основе стека протоколов ТСП/IP, была и остается актуальной для разработчиков протоколов, сетевого оборудования, сервис-провайдеров и конечных пользователей. На всех уровнях сети активно используются механизмы буферизации и управления очередью пакетов, в том числе и адаптивные, призванные, с одной стороны, обслуживать всплески трафика с минимальными потерями пакетов, а с другой, – обеспечить достаточную полосу пропускания и приемлемые для конечного потребителя временные задержки [1].

Крупнейший производитель маршрутизаторов CISCO Systems поддерживает в своих продуктах не менее десяти различных механизмов управления очередью, среди которых достаточно часто [2] на практике используется RED [3]. Дословно аббревиатура обозначает механизм случайного раннего обнаружения перегрузки очереди, позволяющий маршрутизатору удалять либо маркировать пакеты тэгами ECN [4] с заданной вероятностью, извещая источник о необходимости уменьшить окно отсылки ТСП.

Основная проблема механизма RED заключается, по мнению авторов [5], в его неспособности должным образом справляться с перегрузками сети в случае ухода рабочей точки системы далеко от оптимальной. Изменение установок RED по умолчанию также может вызвать ухудшение каче-

ства обслуживания при нормальных условиях функционирования сети. Таким образом, задача состоит в поиске решения, обеспечивающего приемлемое качество обслуживания в условиях, выходящих за рамки стандартных сетевых условий и настроек RED. Решением могла бы стать замена дисциплины обслуживания очереди, однако это не всегда возможно, так как маршрутизатор зачастую находится у сервис-провайдера либо выше по иерархии операторов связи.

В настоящей работе предлагается не замена, а дополнение к механизму RED, позволяющее расширить границы устойчивости системы и, следовательно, – качество обслуживания конечного пользователя.

Выбор математической модели

Несмотря на дискретную природу процессов, происходящих в сетях, непрерывные модели широко используются для анализа производительности и устойчивости функционирования распространенных протоколов и механизмов, включая TCP, RED, ECN [3]. В частности, в работе [6] была предложена модель динамики TCP, названная авторами "жидкостной". Механизм обслуживания очереди RED представлен последовательным соединением нелинейного усилителя и аperiodического звена. Сравнение с результатами натуральных экспериментов в последующих публикациях авторов [7, 8], а также других исследователей [9] продемонстрировало достаточно аккуратное описание динамики TCP, очереди пакетов и механизмов управления очередью.

В работе [7] проанализирована устойчивость системы управления и даны рекомендации по настройке параметров RED на основе упрощенной модели (игнорирующей механизм тайм-аутов TCP) в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))} p(t-R(t)), \\ \frac{dq}{dt} &= \frac{W(t)}{R(t)} N(t) - C, \end{aligned} \tag{1}$$

где W – ожидаемый размер окна TCP (пакетов); q – ожидаемая длина очереди (пакетов); R – время возврата подтверждения, $R = q/C + T_p$ (сек.); C – пропускная способность канала (пакетов/сек.); T_p – задержка, в общем случае случайная, передачи пакета (сек.); N – фактор нагрузки (число одновременных TCP сессий); p – управляющий фактор, вид функции определяется используемой маршрутизатором дисциплиной обслуживания очереди.

Длина очереди $q \in [0, \bar{q}]$ и размер окна $W \in [0, \bar{W}]$ – положительны и ограничены, где \bar{q} и \bar{W} означают соответственно вместимость очереди и максимальный размер окна, p принимает значения из $[0, 1]$.

Первое уравнение системы (1) описывает адаптивный характер ди-

намики ТСП [10], при отсутствии перегрузки сети ($p = 0$) стремясь использовать всю доступную полосу пропускания канала, ТСП аддитивно увеличивает размер окна. При получении, с запаздыванием R , уведомления ECN о перегрузке сети ($0 < p < 1$) или потере пакетов ($p = 1$) ТСП мультипликативно уменьшает размер окна до величины, обеспечивающей его прохождение до адресата. Второе уравнение описывает динамику очереди, изменение длины которой обусловлено отсылкой пакетов, уже находящихся в очереди, с постоянной скоростью C и приемом в хвост очереди новых пакетов, прибывающих от N адресатов со скоростью W/R .

Отсутствующий в системе (1) регулятор, принимая текущее значение q , формирует управляющее воздействие p , которое с задержкой R подается на адаптивный механизм формирования размера окна ТСП источника.

Вектор (W, q) определяет состояние системы, p – вход управления. Рабочая точка системы (W_0, q_0, p_0) определяется следующими условиями:

$$\dot{W} = 0, \dot{q} = 0, R_0 = q_0 / C + T_p. \quad (2)$$

Сделав ряд допущений, авторы [7] выполнили линеаризацию системы (1) в окрестности рабочей точки и получили систему управления, показанную на рис. 1.

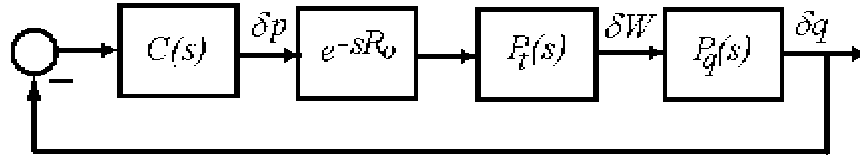


Рис. 1. Линейная система с запаздыванием по управлению.

Здесь $C(s)$ – контроллер очереди; $e^{-R_0 s}$ – задержка; P_t и P_q – звенья, описывающие соответственно динамику ТСП и очереди пакетов.

В случае, когда $C(s)$ представлена регулятором RED, передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$L(s) = C_{red}(s)P_t(s)P_q(s)e^{-ts} = \frac{K_{red}}{(T_{red}s + 1)} \frac{K_t}{(T_t s + 1)} \frac{e^{-ts}}{(T_q s + 1)}, \quad (3)$$

где K_{red}, T_{red} – искомые параметры RED, обеспечивающие цели управления; K_t, T_t – параметры ТСП, вычисляемые по формулам

$$K_t = C^3 R_0^3 / 4N^2, \quad (4a)$$

$$T_t = CR_0^2 / 2N,$$

C, R_0, N – (измеряемые) параметры сети; T_q, t, R_0 – параметры очереди, причем

$$T_q = t = R_0. \quad (4b)$$

Для моделирования использовались следующие диапазоны их изменения:

$$C = 3.75 \times 10^3 \text{ пакетов/сек.}; R_0 = [4 \times 10^{-2} \div 0.52] \text{ сек.}; N = [60 \div 2.5 \times 10^2]. \quad (4c)$$

Границы устойчивости при увеличении задержки

Авторы статьи [7] формулируют задачу настройки регулятора (нахождения K_I, T_I) таким образом: "... система должна обладать приемлемо малым временем отклика. При этом компенсатор должен быть устойчивым к вариациям параметров модели и погрешностям моделирования. Следовательно, целью синтеза является также получение системы с границами безопасности, называемыми иначе *границами устойчивости*".

Используя критерий Найквиста, авторы предлагают выражение для границ технической устойчивости RED, которое записывается следующим образом:

$$K_{red} K_t \leq \sqrt{w_g^2 T_{red}^2 + 1}, \quad (5)$$

где $w_g = 0.1 \min \left\{ \frac{1}{T_t}, \frac{1}{T_q} \right\}$, а числовое значение 0.1 – эмпирический "запас

прочности". Рекомендованные в [7] для практического использования в сети с параметрами (4с) значения K_{red} и T_{red} равны соответственно 1.84×10^{-4} и 200 сек.; далее в работе используются указанные значения совместно со следующими параметрами сети: $C = 3.75 \times 10^3$ пакетов/сек., $N = 60$.

В работе [8] был дан анализ производительности и устойчивости системы, в которой контроллер RED заменен на ПИ-регулятор, т.е. первый сомножитель в (3) имеет вид: $C_{PI}(s) = K_{PI} \frac{(T_{PI}s + 1)}{s}$. Аналитические вы-

кладки и численное моделирование показали, что ПИ-регулятор существенно сокращает время отклика системы и утилизацию канала. Рекомендованные значения K_{PI} и T_{PI} для вышеуказанных параметров сети равны 9.64×10^{-6} и 2.11 сек. соответственно.

Для иллюстрации эффективности рекомендованных значений на рис. 2 приведен результат численного решения уравнений из работы [8] для границ устойчивого управления RED и ПИ-регулятора. Графики изображают максимальное значение времени возврата подтверждения R_0 , при котором еще возможно устойчиво передавать данные со скоростью V_0 . Область выше кривой соответствует неустойчивому управлению с возникновением осцилляций размера окна и времени возврата подтверждения, что крайне негативно сказывается на работе многих приложений реального времени.

Необходимо отметить, что в [8], исследуя ПИ-регулятор в качестве системы управления очередью, использовались достаточно комфортные значения задержки передачи данных $T_p < R_0 < 0.26$ сек., хотя из нижней кривой рис. 2 видно, что границы устойчивой работы системы с ПИ регулятором сужаются по сравнению с RED в линейном случае.

Практическое внедрение решения [8] подразумевает повсеместную

замену программного обеспечения маршрутизаторов, обслуживающих межсетевые каналы связи, что представляется весьма затруднительным даже в пределах одной достаточно крупной организации.

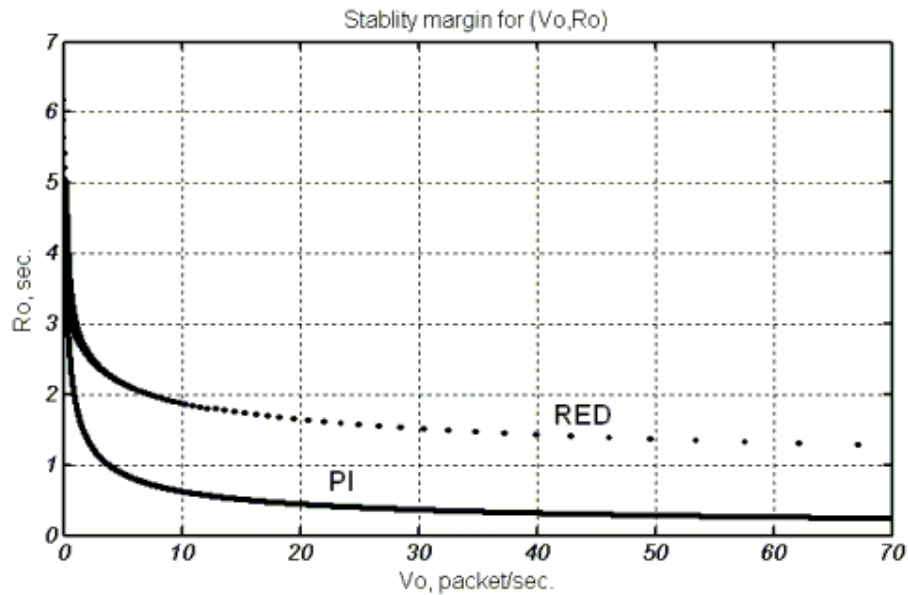


Рис. 2. Область технической устойчивости системы (3) для RED и ПИ-контроллера.

Более простым решением может быть введение в систему динамического корректора, призванного расширить границы устойчивого управления, как показано ниже.

Динамический корректор. Численный эксперимент

В работах [10, 11] рассматривается система управления минимально-фазовым объектом, передаточная функция которой имеет относительный порядок $r = (n - m) > 1$, где n и m – порядок соответственно знаменателя и числителя. В основной контур управления этой системы введено дополнительное устройство – динамический корректор (ДК), состоящий из последовательно соединенных $k = (r - 1)$ упругих звеньев. Целью введения корректора является улучшение динамических характеристик системы управления. В нашем случае системы (3) $k = 2$, – следовательно, передаточную функцию ДК можно записать в виде:

$$W_{ДК}(s) = \frac{d_0 s^2 + d_1 s + d_2}{(T_* s + 1)^2},$$

где коэффициенты числителя d_i должны доставлять ему гурвицевость, а параметр $T_* > 0$ подлежит определению. Порядок числителя в (3) равен нулю, тогда согласно [11] имеем:

$$T_* = \min \left\{ \frac{0.93}{d_0(k-1)} c_0^{-1}, \frac{0.465 d_0}{d_1 k} \right\},$$

где $d_i = d_i$, а c_0 – достаточно велико.

Для исследования динамики системы (1) с корректором была проведена серия численных экспериментов в среде MATLAB. На рис. 3а, б, с даны результаты моделирования, в которых управление $p(t)$ рассмотрено для трех случаев: регуляторов RED [7] и ПИ [8], а также RED с введенным последовательно ДК [11] (метка "DC"). Значения параметров сети и коэффициенты регуляторов RED и ПИ оговорены выше.

Для $c_0 = 10$ при $d_0 = 1$, $d_1 = 2$, $d_3 = 1$ выбрано следующее значение параметра динамического корректора

$$T_* = 0.093 \text{ сек.}$$

В верхней части каждого рисунка представлены годографы соответствующих линейных систем (3) для трех указанных случаев. Задержка передачи данных T_p на представленных рисунках последовательно возрастает, составляя соответственно 0.24, 0.45, 0.75 сек. В нижней части рисунка приведены результаты численного решения системы (1) в виде $V(t) = W(t)/R(t)$, т.е. эффективной скорости передачи данных – величины, по которой конечный потребитель оценивает качество канала связи с другими сетями.

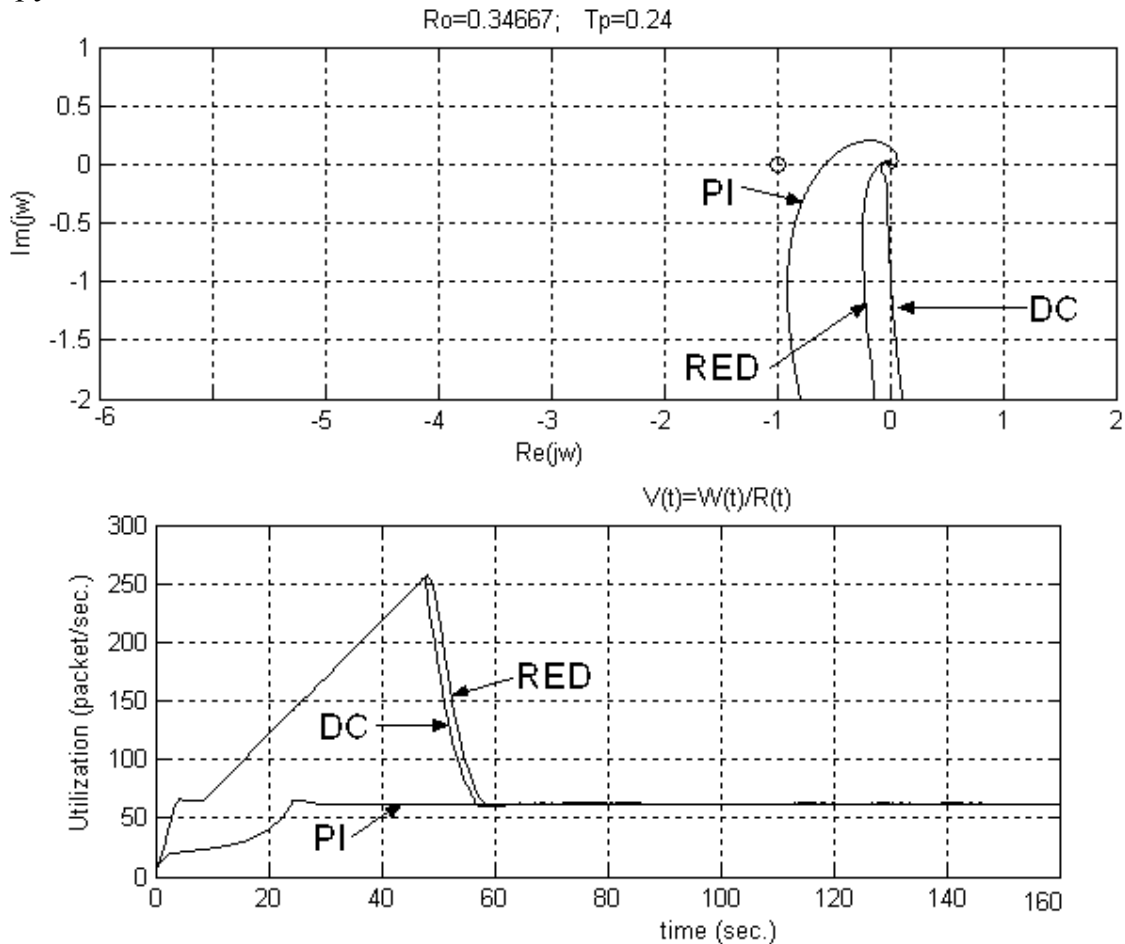
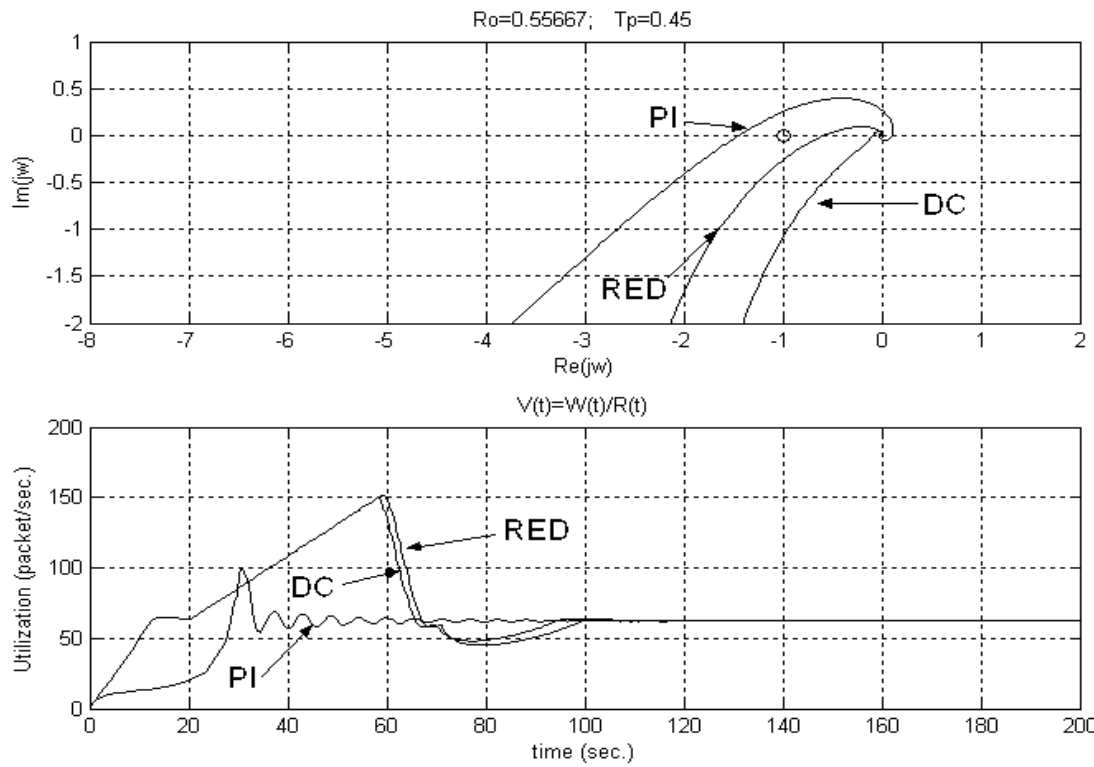
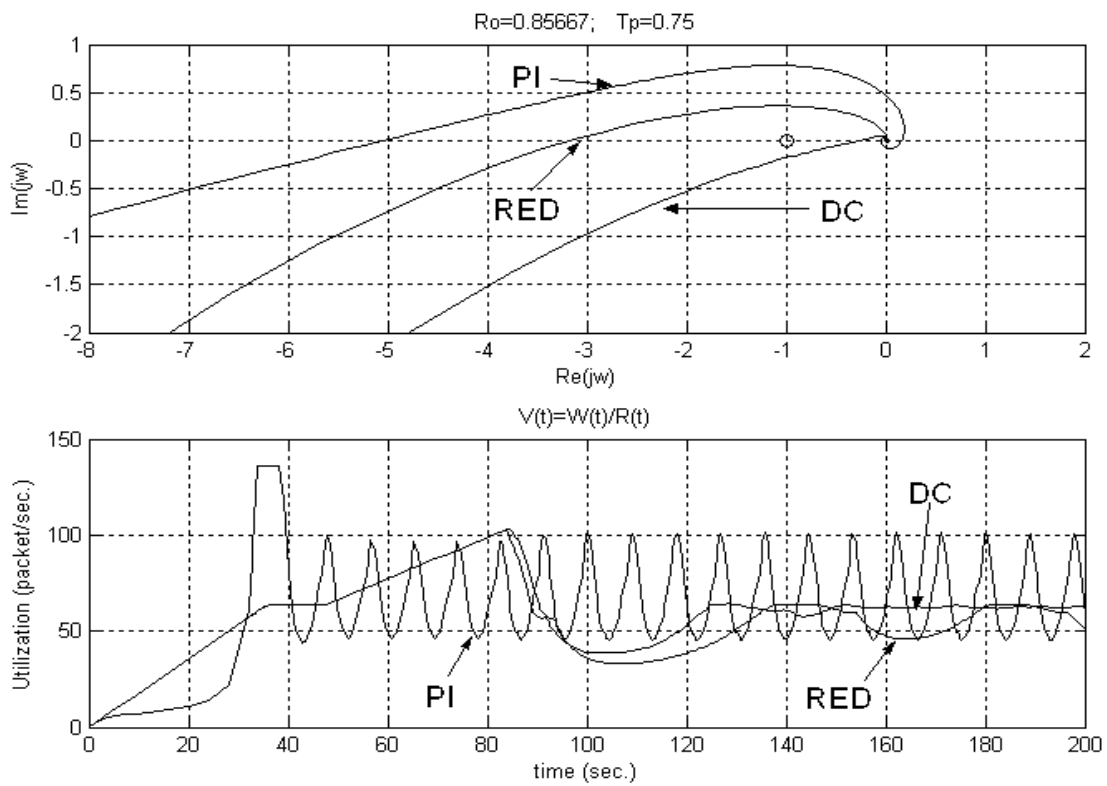


Рис. 3(а). Годограф линейной системы и поведение нелинейной модели.



Puc. 3(b).



Puc. 3(c).

Заключение

Результаты численного моделирования в достаточно частном случае демонстрируют особенности управления нелинейным объектом с запаздыванием на примере долгоживущих TCP сессий. Задержка времени передачи данных считалась постоянной и была выбрана основным параметром моделирования. Влияние помех в виде короткоживущих TCP сессий и UDP пакетов не рассматривалось. Результаты представлены в виде эффективной скорости передачи данных, что наилучшим образом соответствует субъективному пользовательскому понятию качества. Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

при относительно малых задержках ПИ регулятор обеспечивает лучшее управление, даже в случае потери устойчивости линейной модели системы (1);

при больших задержках регуляторы RED и ПИ показывают неприятное для приложений реальное время явление – джиттер [8], схема RED с динамическим корректором в этих условиях оказывается наилучшей.

Благодаря эффективности и простоте схемы ДК его использование в реальной сети представляется оправданным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Key P., McAuley D., Barham P., Laevens K.* Congestion pricing for congestion avoidance. // Microsoft Research report MSR-TR-99.
2. <http://www.cisco.com/web/psa/technologies/index.html?c=268435881>.
3. *Floyd S., Jacobson V.* Random Early Detection gateways for congestion avoidance // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1997. – Vol. 1, No. 4.
4. *Kunniyur S Srikant R.* A Time Scale Decomposition Approach to Adaptive ECN Marking // Proceedings of IEEE/INFOCOM, 2001.
5. *Firoiu V., Borden M.* A Study of Active Queue Management for Congestion Control // Proceedings of IEEE/INFOCOM, 2000.
6. *Misra V., Wei-Bo Gong, Towsley D.* Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED // Proceedings of ACM/SIGCOMM. 2000.
7. *Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong.* A control theoretic analysis of RED // IEEE INFOCOM, 2001.
8. *Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong.* Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows // IEEE Transactions on automatic control. – 2002. – Vol. 47, No.6.
9. *Kelly F.P.* Models for a self-managed Internet // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 2000. A358.
10. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. I // Информатика и системы управления. – 2006. – № 2(12). – С.94-101.
11. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. II // Информатика и системы управления. – 2007. – № 1(13). – С.130-139.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.