ВЕСТНИК ТОГУ. 2010. № 4 (19)

УДК 681.511.4



# СИНТЕЗ РОБАСТНОГО КОНТРОЛЛЕРА ОЧЕРЕДИ AQM МАРШРУТИЗАТОРА

*Еремин Е. Л.* – д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и информатизации (ТОГУ), тел. (4212) 22-44-19, e-mail: ereminel@mail.ru; *Охотников С. С.* – ст. преп. кафедры «Информационные и управляющие системы» (Амурский государственный университет), тел. (4162) 39-45-04, e-mail: ovs@amursu.ru; *Теличенко Д. А.* – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехники» (Амурский государственный университет), тел. (4162) 39-46-32, e-mail: telichenko@yandex.ru

На основе жидкостной модели TCP получена модель номинального объекта управления с запаздыванием – очереди AQM маршрутизатора. С использованием критерия гиперустойчивости В. М. Попова синтезирован робастный алгоритм управления классом данных объектов в условиях априорной неопределенности.

Based on the fluid-flow TCP model the nominal time-delayed plant is presented. Using the Popov absolute criterion the robust control algorithm for class of uncertain objects is developed.

*Ключевые слова:* робастное управление, априорная неопределенность, запаздывание по управлению, критерий гиперустойчивости, управление сетевым затором, RED, AQM.

**Введение**

Широкое распространение приложений Интернет-телефонии, видеоконференцсвязи, распределенных вычислений вызывает неослабевающий интерес исследователей к проблеме мониторинга, управления и стабилизации параметров долгоживущих TCP потоков как задаче автоматического управления. [1]-[4]

Несмотря на дискретную природу процессов, происходящих в сетях с коммутацией пакетов, часть исследователей использует непрерывные модели, получившие название «жидкостных». В работах [5], [6], [9] на основе линеаризованных уравнений методами классической теории управления решаются в основном две задачи: 1) определение настроек RED (*random early detection*) [7], обеспечивающих в заданном диапазоне изменений сетевых параметров достаточные условия устойчивости долгоживущих TCP сессий; 2) синтез других законов управления очередью – PI, PID, FL-контроллера, и демонстрация преимуществ при глобальной замене ими алгоритма RED.

Решение первой задачи не всегда выполнимо в реальных условиях [4] в силу неточности линеаризованной модели. Практическая реализация решений второй задачи означает замену программного обеспечения (в том числе и закрытого) всех промежуточных маршрутизаторов сети, что возможно только в случае принятия предлагаемых механизмов в качестве промышленных стандартов.

Задачей данной работы является синтез робастного закона управления очередью локального маршрутизатора в условиях априорной неопределенности.

**Модель объекта управления**

На рис. 1 представлена простая, но несколько более реалистичная по сравнению с рассмотренными в [5], [6] схема прохождения $N$ долгоживущих TCP сессий от источника $S$ к локальным клиентам через две очереди: 1) очередь маршрутизатора провайдера $q_1(t)$ (пакетов) с дисциплиной обслуживания RED и 2) очередь локального маршрутизатора $q_2(t)$ (пакетов) с алгоритмом обслуживания, подлежащим определению.

Настройки RED маршрутизатора провайдера фиксированы, неизвестны и декларируют ограничение агрегированной пропускной способности очереди величиной $C_1$ (пакетов в секунду). Также через RED маршрутизатор в сторону локальной сети поступает не поддерживающий ECN (*explicit congestion notification*) [8] трафик интенсивности $F(t)$ (пакетов в секунду), который не маркируется, а частично удаляется механизмом RED. Полная его фильтрация осуществляется только на граничном маршрутизаторе локальной сети. После фильтрации не-ECN трафика ECN пакеты попадают в очередь $q_2(t)$, которая ограничивает отправляемый в локальную сеть трафик скоростью $C_2 < C_1$ пакетов в секунду.

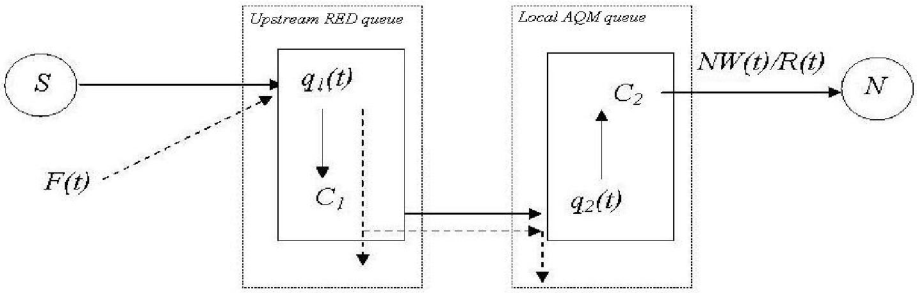


*Рис. 1.* Прохождение N TCP / ECN сессий через две очереди

Система уравнений работы [6] для рассматриваемого случая записываются в виде:

$$\frac{dq_2(t)}{dt} = N\frac{W(t)}{R(t)} - C_2, \qquad (1)$$

$$\frac{dq_1(t)}{dt} = N\frac{W(t)}{R(t)} + F(t)(1 - p_1(t)) - C_1, \qquad (2)$$

$$\frac{d\tilde{q}_1(t)}{dt} = -\alpha_{11}C_1(\tilde{q}_1(t) - q_1(t)), \tag{3}$$

$$\frac{dW(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))}[p_1(t-R(t)) + p_2(t-R(t)) - \\ - p_1(t-R(t))p_2(t-R(t))], \tag{4}$$

здесь индекс при переменных и константах определяет принадлежность очереди.

Уравнение (1) идентично [6] и определяет динамику очереди 2. Уравнение (2) содержит дополнительный член, учитывающий баланс прибытия в очередь 1 и явного удаления не-ECN пакета. Уравнение (3) идентично работе [6] и описывает низкочастотный фильтр RED, где постоянная $\alpha_{11} > 0$ является настроечным параметром очереди маршрутизатора. Уравнение (4) описывает динамику TCP сессий, $W_i(t)$ (пакетов) – ожидаемый размер окна TCP, $R(t)$ (секунд) – время возврата подтверждения выражается, как:

$$R(t) = D + q_1(t)/C_1 + q_2(t)/C_2, \quad D > 0, \tag{5}$$

где $D$ (секунд) – транспортная задержка, постоянная для всех сессий в силу их идентичности. Задержка передачи пакетов между двумя маршрутизаторами считается пренебрежимо малой по сравнению с $D$. В отличие от [6], вероятность $p(t)$ маркировки / удаления пакета зависит от двух независимых событий: маркировки / удаления в очереди 1 и / или очереди 2, и выражена через вероятности этих событий, как:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t). \tag{6}$$

Так как дисциплиной обслуживания первой очереди является RED, то:

$$p_1(t) = \begin{cases} 0 & \tilde{q}_1(t) \le \underline{q_1}, \\ k_1(\tilde{q}_1(t) - \underline{q_1}) & \underline{q}_1 < \tilde{q}_1(t) < \overline{q_1}, \\ 1 & \tilde{q}_1(t) \ge \overline{q_1}, \end{cases} \qquad k_1 = \overline{p}_1/(\overline{q}_1 - \underline{q}_1), \tag{7}$$

где $\overline{p}_1$, $\underline{q}_1$, $\overline{q}_1$ – настроечные параметры маршрутизатора, именующиеся в терминах RED соответственно *Pmax, MinTh, MaxTh* [5].

Получим выражения для точки равновесия системы с тем, чтобы проанализировать область применимости линеаризованной модели. Аналогично [6] определим $[q_2(t), q_1(t), \tilde{q}_1(t), W(t)]^T$ как вектор состояния, $p_2(t)$ как вход и $q_2(t)$ как выход. Найдем равновесные значения параметров сети и вектора состояния, соответствующие постоянному значению выхода $q_{20}$ путем приравнивания левых частей уравнений (1)-(4) нулю. С учетом (5)-(7) получаем:

$$p_{10} = 1 - (C_1 - C_2)/F_0, \quad \tilde{q}_{10} = \underline{q}_1 + p_{10}/k_1, \quad q_{10} = \tilde{q}_{10}, \\ R_0 = D + q_{10}/C_1 + q_{20}/C_2, \; W_0 = C_2R_0/N, \; p_0 = 2/W_0^2, \\ p_{20} = (p_0 - p_{10})/(1 - p_{10}), \tag{8}$$

где ноль, приписанный к индексу, означает равновесное значение параметра либо переменной. Из полученных соотношений нетрудно получить выражение, связывающее диапазон допустимых $N$ с остальными параметрами сети: $N \in [1,\ 0.5C_2R_0\sqrt{p_0}\,]$. Для типичных значений [6]: $C_2 = 10^3$, $R_0 = 0.15$, $p_0 = 0.1$ получаем ограничение $N \in [1,\ 33]$. Таким образом, применимость линеаризованной модели для практически важных случаев высоконагруженных каналов с низкой пропускной способностью лимитирована числом рассматриваемых TCP сессий. С другой стороны, зафиксировав малое $N$, мы не сможем использовать линеаризованную модель для часто встречающихся случаев значительных транспортных задержек.

Следующее практическое ограничение связано с диапазоном допустимых значений интенсивности не-ECN трафика. Действительно, мы ограничиваем выбор рабочей точки $p_{10}$ в соответствии с первым соотношением (8), в которое входит априорно неопределенная величина $F_0$. Пусть $f_0 = F_0 / C_1$ – доля интенсивности не-ECN трафика, а $c_0 = 1 - C_2 / C_1$ – доля полосы пропускания, предусмотренная для него. Очевидно, определяя область допустимых значений $p_{10} \in [0,\ \overline{p}_1)$, где $\overline{p}_1 \approx 0.1$ – настройка RED по умолчанию [9], получаем $f_0 \in c_0[1,\ 0.9^{-1}]$. Последнее означает, что применимость линейной модели ограничена вариацией неизвестной величины $f_0$ в пределах $\pm 5\%$ от ожидаемой – условие на практике редко выполнимое.

Таким образом, в условиях априорной неопределенности возможность применения линеаризованной модели для случая двух и более маршрутизаторов весьма ограничена, что стимулирует использование более реалистичной модели, содержащей как линейную, так и нелинейную составляющие.

**Приближенная модель объекта управления**

Для упрощения системы (1)-(7) сделаем обычные [6], [9] допущения:

1. Режим функционирования RED для очереди 1 является «рабочим» и определяется вторым условием выражения (7);
2. Доля не-ECN трафика постоянна и $C_2$ выбирается с учетом запаса пропускных способностей очередей 1 и 2: $F(t) \approx F_0$, $C_1 > C_2$, $C_2 + F_0 > C_1$;
3. Для последнего уравнения системы используется приближение постоянного запаздывания: $\vartheta(t - R(t)) \approx \vartheta(t - \tau)$, $\vartheta \in \{W, p_1, p_2\}$.

Выполним нелинейную неособую в силу (5) замену переменных системы (1)-(4):

$$x_1(t) = q_2(t),\ x_2(t) = q_1(t) - a_2,\ x_3(t) = p_1(t) - a_3,\ x_4(t) = W(t)/R(t) - a_4, \quad (9)$$

где $a_4 = C_2 / N$, $a_3 = (C_2 - C_1 + F_0)/F_0$, $a_2 = \underline{q}_1 + a_3 / k_1$.

Учитывая (1)-(7) и сформулированные выше допущения, введем для краткости обозначения $x = \{x_i\}$, $x_i = x_i(t),\ i = 1..4$, $\breve{x} = \{\breve{x}_j\}$, $\breve{x}_j = x_j(t - \tau)$, $j = 3{,}4$, выполнив замену $u(t - \tau) = 1 - p_2(t - \tau)$, после несложных преобразований получим:

$$\frac{dx_1}{dt} = Nx_4, \quad \frac{dx_2}{dt} = -F_0 x_3 + Nx_4, \quad \frac{dx_3}{dt} = k_1 C_1 \alpha_{11} x_2 - \alpha_{11} C_1 x_3,$$

$$\frac{dx_4}{dt} = -\frac{a_4}{2} x_4 - \frac{a_4}{2} \bar{x}_4 + \left( \frac{a_4^2}{2}(1 - a_3) + \beta(x, \bar{x}) \right) u(t - \tau) + \gamma(x, \bar{x}), \qquad (10)$$

причем все нелинейные члены сосредоточены в четвертом уравнении.

Далее, аналогично [6], будем считать переменную $x_4$ «медленной» по сравнению с управлением $u$, что дает $x_4 \approx \bar{x}_4$ и окончательную запись разомкнутой системы в пространстве состояний в виде:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B(b + \tilde{\beta}(x, \bar{x}))u(t - \tau) + B\tilde{\gamma}(x), \; y(t) = C^T x(t) \qquad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & N \\ 0 & 0 & -F_0 & N \\ 0 & k_1 \alpha_{11} C_1 & -\alpha_{11} C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \\ C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ b = \dfrac{a_4^2}{2}(1 - a_3), \end{array} \qquad (12)$$

$$\tilde{\beta}(x, \bar{x}) = \frac{1}{2}\left( (1 - \bar{x}_3 - a_3)(x_4^2 + 2a_4 x_4) - a_4^2 \bar{x}_3 \right), \qquad (13)$$

$$\tilde{\gamma}(x) = \frac{1}{R^2(x_1, x_2)} - \frac{1}{2}(x_4^2 + a_4^2) + \frac{x_4 + a_4}{R(x_1, x_2)} \left[ \frac{Nx_4 - F_0 x_3}{C_1} + \frac{Nx_4}{C_2} \right], \qquad (14)$$

$$R(x_1, x_2) = D + (x_2 + a_2)/C_1 + x_1/C_2. \qquad (15)$$

Отметим, что в приведенных уравнениях в силу допущения 2 коэффициенты $a_i > 0, \; i = 2..3$. Также выполняется условие строгой положительности $b$. В случае ограниченных нелинейностей, как это следует из постановки задачи, далее будем решать задачу слежения выхода априорно неопределенного нелинейного объекта с запаздыванием по управлению (11)-(15) за эталонным сигналом.

**Постановка и решение задачи**

Без ограничения общности будем считать, что модель объекта управления задана уравнением (11), в котором матрица $A$ записана во фробениусовой управляемой форме с последней вектор-строкой $\alpha^T$, а
$C^T = L^T = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = b_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$, $b = 1$, $\left|\tilde{\beta}(x, \bar{x})\right| \le \beta_0$, $\left|\tilde{\gamma}(x)\right| \le \gamma_0$, строго положительные величины $a_4$, $\tau$, $\beta_0$, $\gamma_0$ полагаются известными. Также известны $\overline{\alpha_i} \ge \left|\alpha_i\right|, \; i = 1..4$.

Решается задача слежения выхода объекта управления (11) за скалярным выходом эталона $z_m(t)$ : $\dfrac{dx_m(t)}{dt} = A_m x_m(t) + b_m r(t), \quad z_m(t) = g^T x_m(t),$

(16)

здесь $r(t)$ – ограниченное скалярное задающее воздействие $0 < |r(t)| < r_0$, $r_0$ известно. Гурвицева матрица $A_m$ с последней вектор-строкой $\alpha_m{}^T$ и вектор $g^T$ задаются таким образом, чтобы для передаточной функции эталонной модели выполнялось:

$$W_m(s) = \frac{g^T(sE - A_m)^+ b_m}{\det(sE - A_m)} = \frac{a_0(s + a_0)^{n-1}}{(s + a_0)^n} = \frac{a_0}{s + a_0}, \tag{17}$$

где $s$ – комплексная частота, $(\cdot)^+$ – присоединенная матрица, $a_0 > 0$. Для компенсации запаздывания используется упредитель – компенсатор вида [13]:

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = A_m x_k(t) + b_m(u(t) - u(t-\tau)), \quad z_k(t) = g^T x_k(t), \tag{18}$$

где $z_k(t)$ – скалярный выход.

Для восстановления неизмеряемого вектора состояния объекта управления по его выходу аналогично [10] используется стационарный наблюдатель полного порядка вида:

$$\frac{dx_H(t)}{dt} = A_* x_H(t) + b_m u(t) + My(t), \tag{19}$$

$$y_H(t) = L^T x_H(t), \; \bar{y}_H(t) = g^T \bar{x}_H(t),$$

где $\bar{x}_H(t)$ – измеряемый вектор состояния наблюдателя, нормированный, для согласования коэффициентов усиления передаточных функций эталонной модели и наблюдателя на нулевой частоте, величиной $K = -g^T A_*^{-1} M$; $\bar{y}_H(t)$ – обобщенный скалярный выход наблюдателя, а вектор $M$ выбирается таким образом, чтобы собственные значения матрицы $A_* = (A_m - ML^T)$ располагались существенно левее точки $(-a_0, 0)$ на комплексной плоскости. Это обеспечивает быстрый темп стабилизации невязки между истинным и восстановленным векторами состояния и, следовательно, их асимптотическую близость. В этом случае цель управления может быть сформулирована относительно измеряемых выходов наблюдателя (19), эталона (16) и компенсатора (18):

$$\lim_{t \to \infty} |z_m(t) - \bar{y}_H(t) - z_k(t)| \le \delta^2 = const, \tag{20}$$

где $\delta^2$ достаточно мала. Для реализации целевого условия требуется найти закон управления $u(t)$, явный вид которого определяется только известными в постановке задачи числовыми значениями. В соответствии с методикой [14] синтез закона управления на основе критерия гиперустойчивости производится в четыре этапа.

*Во-первых*, получим эквивалентное описание модели, выделив ЛСЧ и нелинейную часть замкнутой системы управления. Запишем уравнения для ошибки слежения $\bar{\varepsilon}(t) = x_m(t) - \bar{x}_H(t) - x_k(t)$:

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = A_m\bar{\varepsilon}(t) + b_m\bar{\mu}(t),$$
$$\bar{\mu}(t) = r(t) - u(t) - \tilde{\gamma}(x) - \tilde{\alpha}^T\bar{x}_H(t) - \tilde{\beta}(x,\bar{x})u(t-\tau), \tag{21}$$
$$\bar{\nu}(t) = g^T\bar{\varepsilon}(t) = g^T(x_m(t) - \bar{x}_H(t) - x_k(t)),$$
где $\tilde{\alpha}^T = \alpha^T - \alpha_m^T$, а $\bar{\mu}(t)$ и $\bar{\nu}(t)$ – скалярное модифицированное управление и обобщенный выход. Из постановки задачи известны $\alpha_{0i} \geq |\tilde{\alpha}_i|,\ i = 1..4$. *Во-вторых*, условие строгой положительной определенности ЛСЧ системы (21) выполняется в силу (17). *В третьих*, докажем выполнимость для нелинейной части системы (21) интегрального неравенства В. М. Попова (ИНП):

$$\eta(0,t) = -\int_0^t \bar{\mu}(s)\bar{\nu}(s)ds \geq -g_0{}^2 = const,\ \forall t > 0\,. \tag{22}$$

С учетом явного вида выражений (21), обозначив для краткости $\xi \equiv \bar{\nu}(t)$, запишем модифицированное ИНП вида:

$$\eta(0,t) = -\int_0^t [Q_1(\xi)r(s) - Q_2(\xi)u(s) - Q_3(\xi)\tilde{\gamma}(s) - \tag{23}$$
$$- Q_4(\xi)\tilde{\alpha}^T\bar{x}_H(s) - Q_5(\xi)\tilde{\beta}(s)u(s-\tau)]\xi ds \geq -g_0{}^2,$$
где $Q_i(\xi)$ – произвольные положительно либо неотрицательно определенные функции своего аргумента, причем во втором случае $Q_i(\xi) = 0$ тогда, и только тогда, когда $\xi = 0$, $I = 1,..,5$. В работе [10] показано, что из выполнения видоизмененного такими весовыми функциями ИНП (23) следует выполнение оценки (22). Положим $Q_1(\xi) \equiv Q_3(\xi) \equiv Q_4(\xi) \equiv Q_5(\xi) \equiv |\xi|,\ Q_2(\xi) \equiv 1$ и запишем (23) в виде:

$$\eta(0,t) = -\int_0^t [r(s)|\xi|\xi \pm r_0|\xi|^2 - u(s)\xi - \tilde{\gamma}(s)|\xi|\xi \pm \gamma_0|\xi|^2 - \tag{24}$$
$$- \tilde{\alpha}^T\bar{x}_H(s)|\xi|\xi \pm \alpha_0^T|\bar{x}_H(s)||\xi|^2 - \tilde{\beta}(s)u(s-h)|\xi|\xi \pm \beta_0|u(s-\tau)||\xi|^2]ds\,.$$

Опустив комбинации слагаемых, дающих неотрицательные величины, получим оценку:

$$\eta(0,t) \geq -\int_0^t [-u(s) + \xi(r_0 + \gamma_0 + \alpha_0^T|\bar{x}_H(s)| + \beta_0|u(s-\tau)|)]\xi ds\,. \tag{25}$$

Приравняв к нулю выражение в квадратных скобках, получим, с одной стороны, выполнения условий (23) и (22), а с другой стороны – явный вид закона управления:

$$u(t) = (z_m(t) - y_H(t) - z_k(t))(r_0 + \gamma_0 + \alpha_0^T|\bar{x}_H(t)| + \beta_0|u(t-\tau)|), \tag{26}$$
содержащий только известные и измеряемые величины.

*В четвертых*, покажем выполнимость целевого условия (20). Так как полученный закон управления обеспечивает выполнимость ИНП (22), а линейная стационарная часть эквивалентной системы (21), с учетом (17), устойчива, то исходная замкнутая система (21), (26) гиперустойчива, и для нее выполнимо условие (20). Что и требовалось показать.

Таким образом синтезирован робастный закон управления, использующий известные оценки априорно неопределенных параметров объекта управления.

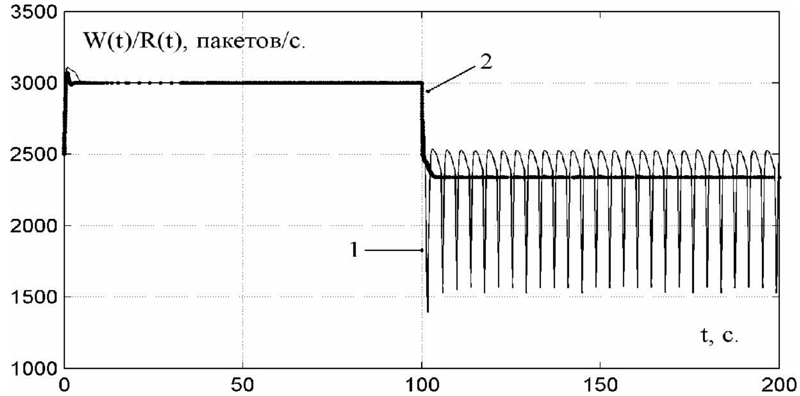


*Рис. 2.* Стабилизация скорости передачи данных на локальном маршрутизаторе при увеличении интенсивности не-ECN трафика:
1 – с контроллером RED, 2 – с контроллером очереди (26)

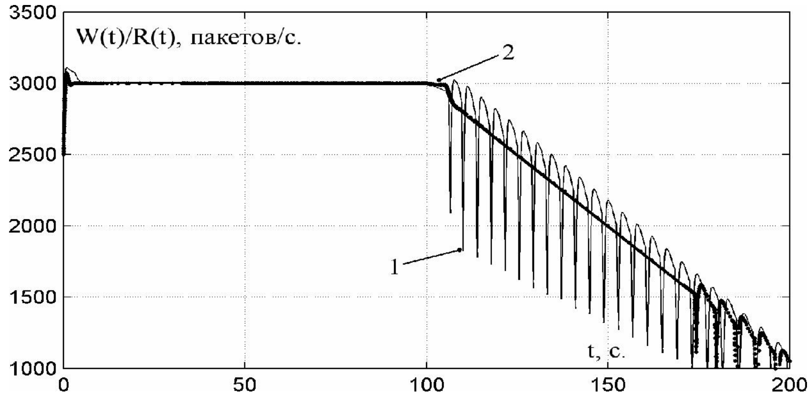


*Рис.3.* Стабилизация скорости передачи данных на локальном маршрутизаторе при равномерном уменьшении доступной полосы пропускания:
1 – с контроллером очереди RED, 2 – с контроллером очереди (26)

**Численное моделирование**

Для проверки работоспособности полученного алгоритма было проведено моделирование в среде SIMULINK. Параметры сети и настройки RED были аналогичны тем, что использовались в работах [6], [9]. Во всех экспериментах очередь 1 обслуживалась контроллером RED, транспортная задержка составляла 0.24 секунды, количество долгоживущих TCP / ECN потоков $N = 60$. В двух сериях экспериментов решалась задача стабилизации выхода системы (1)-(4) в случаях: 1) ступенчатого увеличения в два раза интенсивности не-ECN трафика в момент времени $t$ =100 сек.; 2) линейного во времени уменьшения полосы пропускания маршрутизатора провайдера. В первой серии управление локальной очередью осуществлялось контроллером RED вида (3), (7), во второй серии использовался закон (26).

Из представленных рисунков можно заключить, что синтезированный алгоритм управления обеспечивает лучшее, по сравнению с RED, качество управления очередью локального маршрутизатора при решении задач стабилизации в условиях неопределенности параметров сети.

**Заключение**

Рассмотрено решение задачи синтеза робастного закона управления нелинейным объектом с запаздыванием, модель которого описывает динамику долгоживущих TCP сессий, локальной очереди и очереди внешнего RED маршрутизатора в условиях априорной неопределенности. Основным отличием данного исследования от подобных работ [5]-[6], [9] является: 1) учет нелинейности модели, что значительно расширяет обоснованную область применимости полученного закона управления по сравнению с линейными моделями; 2) использование полученного алгоритма для управления и стабилизации сетевых параметров только в пределах локальной сети, что, тем не менее, может обеспечивать глобальную стабильность параметров транспортного протокола от источника до получателя; 3) одновременное решение задачи наблюдения за недоступными измерению параметрами удаленной сети, актуальной для мониторинга состояния сети и выявления различного рода сетевых аномалий.

Работа выполнена в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 гг.)», проект 2.1.2/373.

**Библиографические ссылки**

1. *Firoiu V., Borden M.* A Study of Active Queue Management for Congestion Control // Proceedings of IEEE/INFOCOM, 2000.
2. *Key P., McAuley D., Barham P., Laevens K.* Congestion pricing for congestion avoidance // Microsoft Research report MSR-TR-99.
3. *Geoff Huston*, The Future for TCP // The Internet Protocol Journal, Vol. 3, No. 3, September 2000.
4. *Kelly F. P.* Models for a self-managed Internet // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 2000. A358.
5. *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.
6. *Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong.* A control theoretic analysys of RED // IEEE INFOCOMM, 2001.
7. *Floyd S., Jacobson V.* Random Early Detection gateways for congestion avoidance // IEEE /ACM Transactions on Networking. – 1997. – Vol. 1, No. 4.
8. *Kunniyur S Srikant R.* A Time Scale Decomposition Approach to Adaptive ECN Marking // Proceedings of IEEE / INFOCOM, 2001.
9. *Hollot C. V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong.* Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows // IEEE Transactions on authomatic control. – 2002. – Vol. 47, No. 6.

10. *Еремин Е. Л., Кван Н. В., Семичевская Н. П.* Робастное управление нелинейным объектом со стационарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью // Информатика и системы управления. – 2008. – № 4 (18). – С. 122-130.

11. *Еремин Е. Л., Теличенко Д. А., Чепак Л. В.* Адаптивная периодическая система для объекта с запаздыванием по управлению // Информатика и системы управления. – 2008. – № 1 (15). – С. 169-178.

12. *Попов В. М.* Гиперустойчивость автоматических систем / М.: Наука, 1970.

13. *Еремин Е. Л., Теличенко Д. А., Чепак Л. В*. Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению / Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006.

14. *Еремин Е. Л.* Гиперустойчивость системы управления нелинейным объектом с запаздыванием // Автоматизация технологических процессов. – Фрунзе: Фрунз. политех. ин-т, 1987. – С. 89-95.

15. *Еремин Е. Л., Охотников С. С., Теличенко Д. А.* Робастная система со стационарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью для нелинейных объектов с запаздыванием по управлению // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. – № 2 (17).