

В.И. Гостев¹, В.Д. Кротов², А.С. Артюшик³

¹ доктор технических наук, профессор,

² аспирант ДУИКТ,

³ аспирант кафедры КС ДУИКТ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И РОБАСТНОСТИ AQM-СИСТЕМЫ С РЕГУЛЯТОРОМ СОВОКУПНОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

В работе методом логарифмических частотных характеристик исследована робастность системы активного управления очередью пакетов (AQM-системы) сетей TCP/IP, в которой звено чистого запаздывания аппроксимировано звеном Паде 2-го порядка.

Ключевые слова: AQM-системы, PI-регуляторы, модель TCP/ARC, MATLAB.

Введение

Активное управление очередью (AQM) осуществляется путем предоставления обратной информации от маршрутизатора, в котором может быть переполнение буфера. Во многих современных AQM-системах используют PI-регуляторы из-за их простоты и эффективности [1-5]. В данной работе исследована робастность AQM-системы совокупной скорости для Интернет трафика с PI-регулятором совокупной скорости (**Aggregate Rate Controller - ARC**-регулятором [4]) на основе интерактивной системы **MATLAB**.

Решение задачи

На рис.1 показана блок-схема **TCP-ARC** линейной системы управления с обратной связью, которая моделирует N TCP источников и один перегруженный маршрутизатор **ARC** с использованием линейной модели **TCP**.

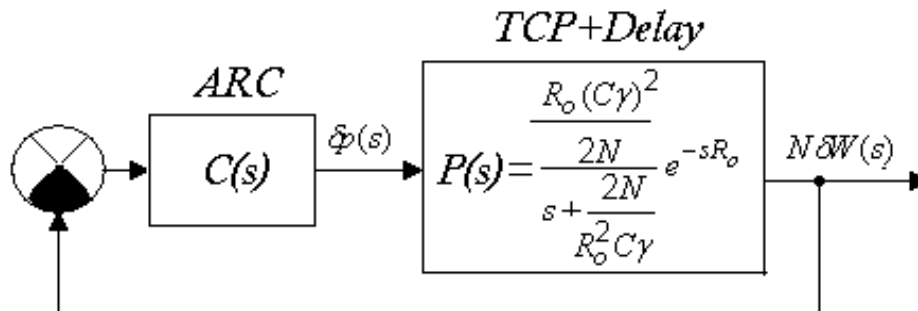


Рис.1. Модель TCP/ARC системы управления с обратной связью и задержкой распространения

На рисунке R_o - время следования туда и обратно – **round trip time** (в сек), C - емкость связи (пропускная способность перегруженной линии, пакеты/сек), γ - целевое использование линии ($0 < \gamma \leq 1$), W - предполагаемый (средний) размер окна TCP (в пакетах), pp - вероятность уведомления о перегрузке (вероятность маркировки/отбрасывания пакетов) системы, N - коэффициент нагрузки-**load factor** (число TCP сессий).

Передаточная функция ARC-регулятора:

$$C(s) = \frac{\frac{\alpha}{d} \left(s + \frac{1+\gamma}{R_o} \right)}{s \left(s + \frac{1}{R_o} \right)}. \quad (1)$$

Поскольку в модель ARC встроена модель поведения очереди т.е. $C(s) = Q(s)C_q(s)$, где модель поведения очереди описывается передаточной функцией $Q(s) = \frac{1}{R_o} / \left(s + \frac{1}{R_o} \right)$, то находим, что

$$C_q(s) = \frac{\alpha(1+\gamma)}{d} \frac{\left(\frac{R_o s}{1+\gamma} + 1 \right)}{s} = K_i \frac{\frac{s}{T_p} + 1}{s}, \quad (2)$$

где $T_p = \frac{1+\gamma}{R_o}$; $K_i = \frac{\alpha(1+\gamma)}{d}$; $K = \frac{K_i}{T_p} = K_i \frac{R_o}{1+\gamma} = \frac{\alpha R_o}{d}$.

Нетрудно видеть, что передаточная функция $C_q(s)$ представляет собой передаточную функцию PI-регулятора, который называют для данной системы ARC-регулятором

$$C_q(s) = K + K_i \frac{1}{s}. \quad (3)$$

Модель TCP/ARC системы управления с обратной связью, задержкой распространения, ARC-регулятором и динамикой очереди представлена на рис.2.

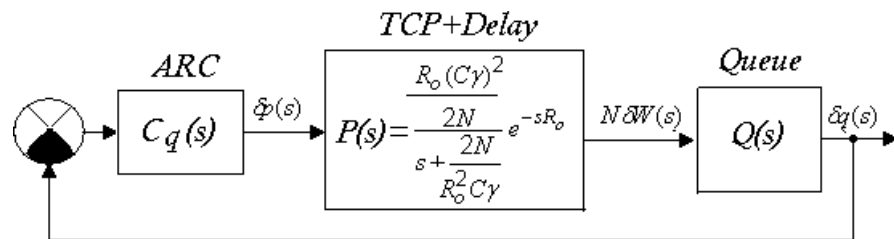


Рис.2. Модель TCP/ARC системы управления с обратной связью, задержкой распространения, ARC-регулятором и динамикой очереди

Передаточную функцию TCP-ARC системы в разомкнутом состоянии определим как

$$L(s) = Q(s)C_q(s)P(s) \quad (4)$$

и на основании рис.2 и формул (1-4) получаем:

$$L(s) = G(s)P(s) = \frac{\alpha R_o (\gamma C)^2 (s + \frac{1+\gamma}{R_o})}{2dN} e^{-sR_o} \cdot \frac{1}{s [s^2 + (\frac{1}{R_o} + \frac{2N}{R_o^2 \gamma C})s + \frac{2N}{R_o^3 \gamma C}]} \quad (5)$$

$$L(s) = G(s)P(s) = \frac{\alpha (R_o \gamma C)^3 (1+\gamma)}{4N^2 d} \frac{(\frac{R_o}{1+\gamma} s + 1)}{s [\frac{R_o^3 \gamma C}{2N} s^2 + (\frac{R_o^2 \gamma C}{2N} + R_o) s + 1]} e^{-sR_o}$$

Передаточную функцию звена запаздывания аппроксимируем функцией **Паде** второго порядка. Для приближения **Паде** второго порядка можно записать:

$$e^{-sR_o} = \frac{s^2 - \frac{3}{\tau} s + \frac{3}{\tau^2}}{s^2 + \frac{3}{\tau} s + \frac{3}{\tau^2}} = \frac{\frac{\tau^2}{3} s^2 - \tau s + 1}{\frac{\tau^2}{3} s^2 + \tau s + 1} \approx \exp(-2\tau s),$$

где $\tau = R_o / 2$. Или

$$e^{-sR_o} \approx \frac{\frac{R_o^2}{12} s^2 - \frac{R_o}{2} s + 1}{\frac{R_o^2}{12} s^2 + \frac{R_o}{2} s + 1} \quad (6)$$

Подставляя (6) в выражение (5), получим:

$$L(s) = \frac{\frac{\alpha (R_o \gamma C)^3 (1+\gamma)}{4dN^2} (\frac{R_o}{1+\gamma} s + 1) (\frac{R_o^2}{12} s^2 - \frac{R_o}{2} s + 1)}{s [\frac{R_o^3 \gamma C}{2N} s^2 + (\frac{R_o^2 \gamma C}{2N} + R_o) s + 1] (\frac{R_o^2}{12} s^2 + \frac{R_o}{2} s + 1)} \quad (7)$$

Используя пакет **Control System Toolbox 5.0** интерактивной системы **MATLAB** [6], определим логарифмические частотные характеристики **ЛЧХ** (диаграммы **Bode**) системы (см. рис.1), скорректированной **ARC**-регулятором, по передаточной функции (7). Воспользуемся параметрами непрерывной части системы (объектом управления), взятыми из работы [6]. Логарифмические частотные характеристики при выбранных параметрах схемы $\alpha = 1,42 \cdot 10^{-5}$, $R_o = 0,246$ (сек), $\gamma = 0,98$, $C=2000$ (пакетов/сек), $d = 1$ (сек), числе сессий $N = 100$, и настроенном регуляторе приведены соответственно на рис.3.

Программа расчета ЛЧХ системы, которая скорректирована ARC-регулятором, может быть записана в системе MATLAB таким образом:

```
A=1.42*10^(-5); R= 0.246; L=0.98; C=2000; d=1; N=100;
alf= A*(R*L*C)^3*(1+L)/(4*d*N^2);
f1=alf*[R/(1+L) 1]; f2=[R^2/12 (-R)/2 1];
f3=[1 0]; f4=[R^3*L*C/2/N (R^2*L*C/2/N+R) 1]; f5=[R^2/12 R/2 1];
num= conv(f1,f2); den=conv(f3,conv(f4,f5));
sys=tf(num,den); [mag,phase,w]=bode(sys);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(mag,phase,w); margin(sys)
```

Приведем еще один вариант программы расчета ЛЧХ в системе MATLAB с ARC - регулятором:

```
A=1.42*10^(-5); R= 0.246; L=0.98; C=2000; d=1; N=100;
alf= A*(R*L*C)^3*(1+L)/(4*d*N^2);
[np,dp]=pade(R,2); sysp=tf(np,dp);
f1=[1 0]; f2=[R^3*L*C/2/N (R^2*L*C/2/N+R) 1];
num= alf*[R/(1+L) 1]; den=conv(f1,f2);
sysg=tf(num,den); sys=series(sysp,sysg);[mag,phase,w]=bode(sys);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(mag,phase,w); margin(sys)
```

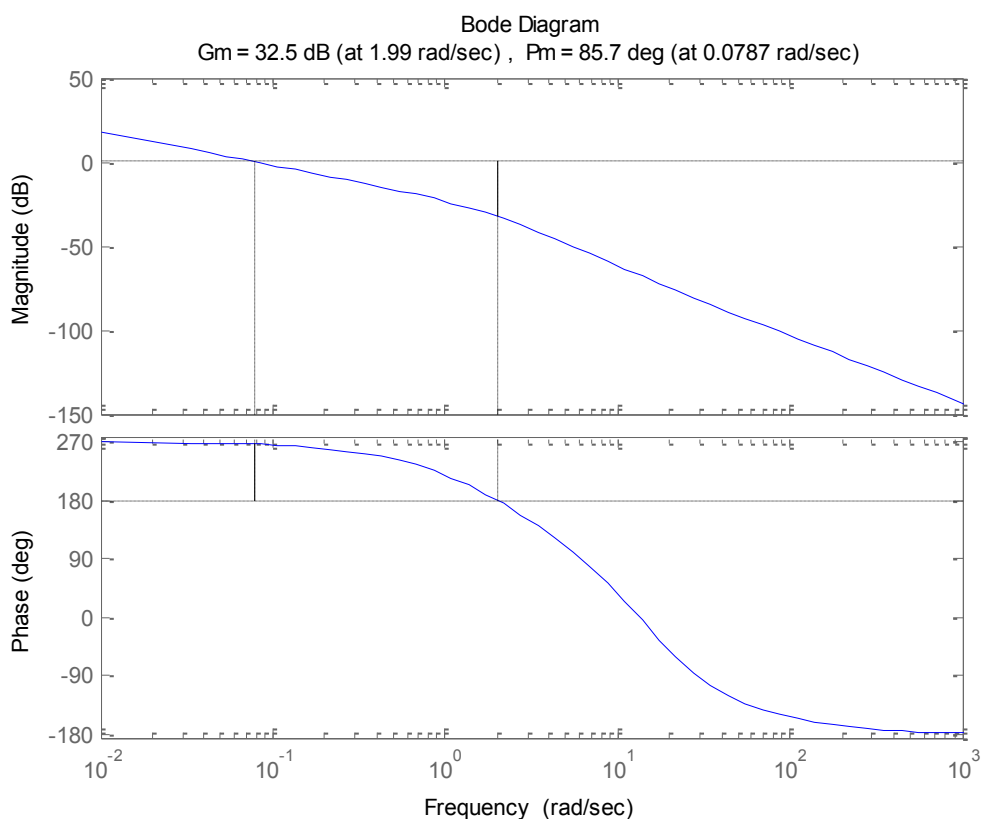


Рис.3. ЛЧХ системы с ARC-регулятором при N=100

В этой программе имеется специальная подпрограмма для функции **Паде**.

Существенно отметить, что функция **Паде** преобразует **минимально-фазовую** систему с регулятором совокупной скорости в **неминимально-фазовую** систему.

По ЛЧХ находим: запас устойчивости системы, имеющей передаточную функцию (7) со звеном запаздывания, по амплитуде $G_m=32,5$ децибелл на частоте $\omega_\pi=1,99$ радиан/сек, запас устойчивости по фазе $P_m=85,7$ градусов на частоте среза $\omega_c=0,0787$ радиан/сек.

АQM-система с регулятором совокупной скорости для эффективной регулировки перегрузок при выбранных параметрах схемы и настроенном регуляторе является устойчивой и обладает хорошими запасами устойчивости по амплитуде и фазе.

Метод ЛЧХ позволяет достаточно просто определить робастность системы (см. рис.2), т.е. способность системы сохранять устойчивость при изменяющихся параметрах объекта управления. В таблицах 1, 2 и 3 определена устойчивость системы при различных R_o , N и C .

Табл.1

R, сек	Gm	Pm, град	ω_c , рад/сек	ω_π , рад/сек
0,2	40	88,3	0,0423	2,67
0,246	32,5	85,7	0,0787	1,99
0,3	25,4	79,2	0,142	1,5
0,4	15,1	54,1	0,304	0,987

Табл.2

N	Gm	Pm, град	ω_c , рад/сек	ω_π , рад/сек
150	40,2	88,5	0,035	2,36
100	32,5	85,7	0,0787	1,99
50	19,7	64,4	0,297	1,46

Табл.3

C	Gm	Pm, град	ω_c , рад/сек	ω_π , рад/сек
2000	32,5	85,7	0,0787	1,99
2500	26,4	80,3	0,153	1,81
3000	21,5	71,6	0,259	1,66

Вывод. По результатам видно, что система (рис.2) обладает достаточной робастностью, т.е. является устойчивой при изменении параметров объекта управления в широких пределах.

Литература

- Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Gong W.B. "A Control Theoretic Analysis of RED," in Proceedings of IEEE/INFOCOM, April, 2001, pp. 1510-1519.
- Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Gong W.B. "Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows". IEEE/ACM Transactions on Automatic Control, vol. 47, no.6, pp. 945-959, June 2002.
- Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Gong W.B., "On Designing Improved Controllers for Routers Supporting TCP Flows", in Proceedings of IEEE INFOCOM'2001, April 2001, 1726-1734.
- Chung J., Claypool M. "Aggregate Rate Control for Efficient and Practical Congestion Management", Technical Reports, Worcester Polytechnic Institute, Aug 2004
- Гостев В.И., Скуртов С.Н. Фаззи-системы активного управления очередью в сетях TCP/IP: монография. – Нежин: ООО "Видавництво "Аспект-Поліграф", 2011. – 464 с.
- Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.- 832 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Петров А.С.

В.І. Гостев, В.Д. Кротов, А.С. Артюшик
ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА РОБАСТНОСТІ AQM-СИСТЕМИ З
РЕГУЛЯТОРОМ СУКУПНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ В ЗАХИЩЕНИХ
СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

В роботі методом логарифмічних частотних характеристик досліджено робастність системи активного управління чергами пакетів (AQM-системи) мереж TCP/IP, в якій ланка чистого запізнювання аппроксимовано ланкою Паде 2-го порядку.

Ключові слова: AQM-системи, PI-регулятори, модель TCP/ARC, MATLAB.

V.I.Gostev, V.D. Krotov, A.S.Artyushchik
DEFINITION STABILITY AND ROBUST AQM-SYSTEM CONTROLLER
TOTAL RATE IN THE PROTECTED COMMUNICATION SYSTEMS

In the paper the method of logarithmic frequency characteristics of the investigated robust speed of the system of active queue management packages (AQM system) TCP/IP networks, which link net lag аппроксимовано link Pade 2-nd order.

Keywords: AQM-system, PI-controllers, model TCP / ARC, MATLAB.