

*Володимир Іванович Гостев (д-р техн. наук, професор)
Вадим Дмитрович Кротов*

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ ЧЕРГОЮ ПРИ ЗМІННИХ ПАРАМЕТРАХ TCP/IP МЕРЕЖ

Проблема забезпечення якості обслуговування в мережах, які працюють на основі стека протоколів TCP/IP, була і залишається актуальною для розробників протоколів, мережевого устаткування, сервіс-провайдерів і кінцевих користувачів. На всіх рівнях мережі активно використовуються механізми буферизації і управління чергою пакетів, в тому числі і адаптивні, покликані, з одного боку, обслуговувати сплески трафіку з мінімальними втратами пакетів, а з іншого, – забезпечити достатню смугу пропускання і прийнятні для кінцевого споживача тимчасові затримки. У цій статті досліджено процеси в системах активного управління чергою Active Queue Management (AQM-системах) при використанні PID-, PI- і RED-регуляторів при змінних параметрах TCP/IP мережі (випадковій зміні навантаження трафіку – випадковій зміні числа сесій TCP і випадковій зміні часу проходження туди і назад (round trip time RTT)) на основі інтерактивної системи MATLAB.

Ключові слова: AQM-системи; мережі TCP/IP; PID-, PI- і RED-регулятори.

Вступ

Постановка проблеми. Для сучасних телекомунікаційних систем з комутацією пакетів характерне явище перевантаження, для боротьби з яким використовують різні методи. Серед них важливе місце займають методи управління чергою пакетів в маршрутизаторах. Існує два види управління чергою: активне і пасивне. При пасивному управлінні відбувається відкидання пакетів, які приходять у той час, коли у відповідній каналній черзі відсутні вільні місця. Це метод відкидання хвоста (Tail Drop), який простий у реалізації, але має ряд істотних недоліків, з якими успішно справляються методи активного управління чергою – Active Queue Management (AQM). Системи AQM, щоб уникнути переповнення черги, відкидають або маркують певну частину пакетів, які потрапляють в маршрутизатор, до моменту переповнення відповідної каналної черги. Типовим прикладом AQM-систем є системи з PID-регулятором (proportional-integral-derivative), PI-регулятором (proportional-integral) і RED-регулятором (random early detection) [0-0]. При використанні PID, PI і RED алгоритмів надходять у буфер пакети випадково відкидаються (маркуються) з ймовірністю, яка залежить від довжини черги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [0-0] описані і проаналізовані лінеаризовані системи AQM з цими алгоритмами як системи автоматичного управління. Ці системи описані передавальними функціями з постійними параметрами, хоча реальні AQM системи є системами з випадковими, стохастичними параметрами.

Мета статті. Враховуючи це, метою статті є дослідження AQM системи з PID, PI і RED

регуляторами як системи із змінними параметрами при випадковій зміні навантаження трафіку (випадковій зміні числа сесій TCP) і випадковій зміні часу проходження туди і назад (round trip time RTT) на основі інтерактивної системи MATLAB [0-0].

Методи дослідження

У ході дослідження використовувалися такі методи: аналіз теоретичних джерел з проблем управління чергою пакетів в AQM-системах, вивчення та узагальнення передового досвіду управління перевантаженнями черги в мережах TCP/IP, аналіз та оцінка алгоритмів управління (регуляторів для AQM-систем) при змінних параметрах TCP/IP мережі.

Виклад основного матеріалу дослідження

На рис. 1а наведена блок-схема системи активного управління чергою Active Queue Management (AQM-системи) зі зворотним зв'язком і AQM законами управління (AQM-регуляторами - PID, PI і RED регуляторами), докладний опис якої розглянуто в роботах [0-0]. Динаміка об'єкта описується передатною функцією, яка являє собою відношення по Лапласу змінної "довжини черги" до змінної "ймовірності відкидання/маркування пакету" і визначена в роботах [0-0] для сталого режиму як:

$$G(s) = \frac{\delta q(s)}{\delta p(s)} = P(s)e^{-sR_0} = \frac{C^2}{(s + \frac{2N}{R_0^2 C})} e^{-sR_0} \left(s + \frac{1}{R_0} \right), \quad (1)$$

де C – ємність зв'язку (пакети/сек), $R_0 = \frac{q}{C} + T_p$ – час слідування туди і назад – round trip time RTT (у сек), T_p – затримка розповсюдження (у сек), N – коефіцієнт навантаження (кількість TCP сесій).

Передавальну функцію ланки запізнювання зазвичай апроксимують за допомогою функції Паде. Для наближення Паде другого порядку можна записати:

$$e^{-sR_0} \approx \frac{s^2 - \frac{6}{R_0}s + \frac{12}{R_0^2}}{s^2 + \frac{6}{R_0}s + \frac{12}{R_0^2}} \quad (2)$$

З урахуванням (2) передавальну функцію об'єкта управління (1) можна записати у вигляді:

$$G(s) = P(s)e^{-sR_0} = \frac{C^2}{2N} \frac{(s^2 - \frac{6}{R_0}s + \frac{12}{R_0^2})}{(s + \frac{2N}{R_0^2 C})(s + \frac{1}{R_0})(s^2 + \frac{6}{R_0}s + \frac{12}{R_0^2})} \quad (3)$$

На рис. 1а q – передбачувана довжина черги (в пакетах), p – ймовірність маркування(відкидання) пакетів, $\delta q = q_0 - q$, $p = p_0 + \delta p$, q_0 , p_0 – значення довжини черги та ймовірності маркування (відкидання) пакетів в робочій точці.

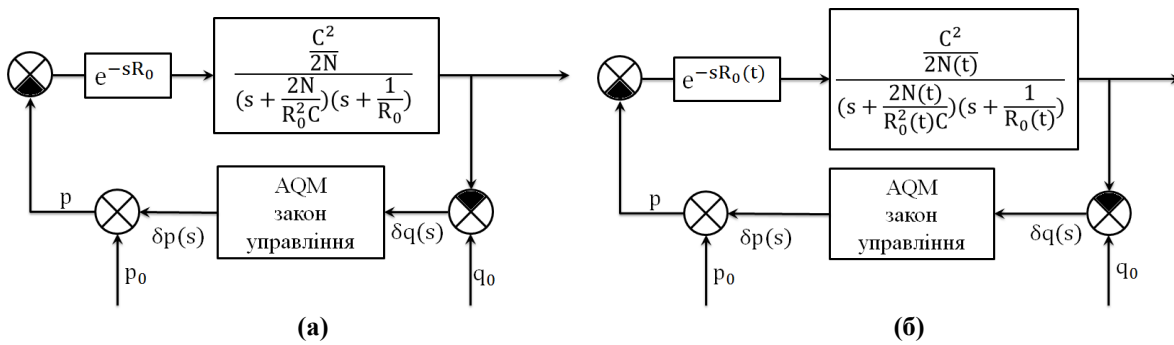


Рис. 1. Загальна схема AQM системи, яка скорегована AQM-регулятором

2. Модель описує адитивне збільшення і мультиплікативне зменшення (AIMD) поведінки TCP, в той час як ігнорує стан "повільного старту" (slow start) і перерву. Хоча модель точна у більшості умов, тому що запобігання перевантажень - первинний операційний стан TCP, спеціально для тривалих передач, таких як FTP-потоки, але у випадку нетривалих потоків таких, як Telnet або Web, часто трапляються стан повільного старту та перерва.

3. Основна відмінність моделі від реальної моделі мережі полягає у тому, що кількість активних сесій TCP (N) і час слідування туди і назад (RTT) в моделі на рис. 1а прийняті постійними. Однак ці параметри є у високому ступені змінними в мережі.

Нижче досліджені AQM системи з PID, PI і RED регуляторами як системи із змінними параметрами при випадковій зміні навантаження трафіку (випадковій зміні числа сесій TCP і випадковій зміні часу проходження туди і назад) на основі інтерактивної системи MATLAB.

В інтерактивній системі MATLAB можна представити модель об'єкта управління з'єднанням ланок з мінливими випадковим чином параметрами $N(t)$ і $R_0(t)$ і структурну схему AQM системи, яка скорегована AQM-регулятором,

Лінійна модель, з передавальною функцією, яка описана рівнянням (3), і представлена на рис. 1а, відрізняється від реальної моделі мережі наступним [0]:

1. Модель розглядає тільки TCP-потоки і ігнорує інші види потоків. Фактично, Інтернет – суміш різних потоків. Деякі джерела використовують механізми управління перевантаженнями як TCP, в той час як деякі відео додатки приймають постійну швидкість передачі бітів (CBR), яка байдужа до перевантажень. Далі, різні версії виконання TCP, такі як TCP Reno, TCP New-Reno, TCP Vegas і т.д., буде співіснувати в Інтернеті. Фактично, модель точно описує механізм управління перевантаженнями TCP Reno в сталому режимі роботи при постійних параметрах ємності зв'язку C , часу проходження туди і назад R_0 і коефіцієнті навантаження N .

зобразити у вигляді рис. 1б. Конкретні моделі AQM систем наведені на рис.2 і 4.

Підсилювальна ланка $C^2/2N(t)$ моделюється блоками підсилювача Gain1 і дільником Product1 (на рис. 2 і 4), на верхній вхід якого надходить сигнал $N(t)$. Аперіодична ланка $[s + 2N(t)/R_0^2(t)/C]$ моделюється інтегратором Integrator, який охоплений негативним зворотним зв'язком, яка включає помножувач Product, на нижній вхід якого надходить сигнал $N(t)$, дільник Product4, на верхній вхід якого надходить сигнал $R_0^2(t)$ і підсилювач Gain2 з коефіцієнтом $2/C$. Аперіодична ланка $[s + 1/R_0(t)]$ моделюється інтегратором Integrator1, який охоплений негативним зворотним зв'язком, яка включає дільник Product2, на верхній вхід якого надходить сигнал $R_0(t)$ і підсилювач Gain4 з коефіцієнтом, що дорівнює одиниці. Ланка чистого запізнювання при апроксимації функцією Паде другого порядку (див. формулу (4)) моделюється за допомогою двох інтеграторів, двох підсилювачів з коефіцієнтами 6 і 12 і двох дільників на верхні входи яких надходять сигнали $R_0(t)$ і $R_0^2(t)$.

$$e^{-sR_0} \approx \frac{s^2 - \frac{6}{R_0(t)}s + \frac{12}{R_0^2(t)}}{s^2 + \frac{6}{R_0(t)}s + \frac{12}{R_0^2(t)}} \quad (4)$$

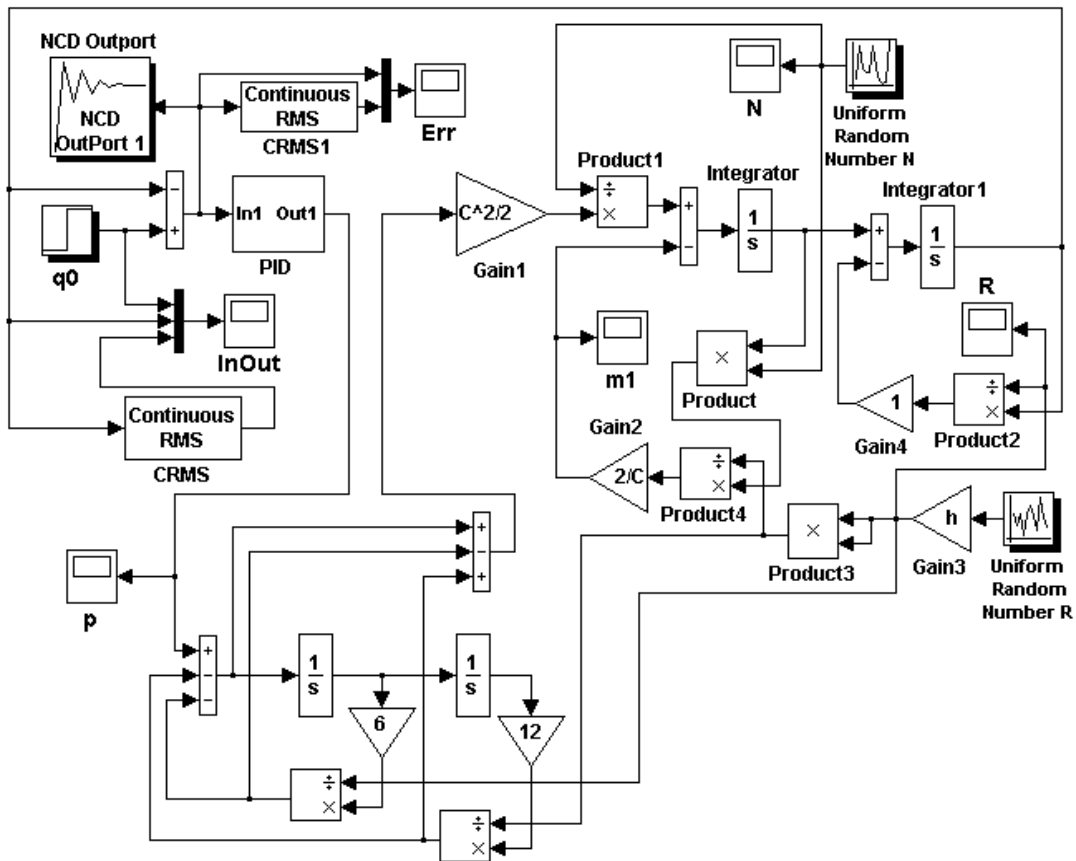


Рис. 2. Модель AQM системи, яка скорегована PID-регулятором

У моделі AQM системи, показаної на рис. 2, для корекції системи використовуємо PID-регулятор. В інтерактивній системі MATLAB передавальна функція цифрового PID-регулятора (PID на рис. 3) може бути записана різними способами, оскільки інтегрування та диференціювання в цифровій формі може бути виконано різними методами. Напишемо передавальну функцію PID-регулятора, структурна схема якого наведена на рис. 3 [0]:

$$W(z) = K + \frac{K_i h_0 z + 1}{2 z - 1} + \frac{K_d z - 1}{h_0 z} = G_1 + G_2 \frac{z + 1}{z - 1} + G_3 \frac{z - 1}{z}, \quad (5)$$

де h_0 – крок дискретизації (крок квантування).

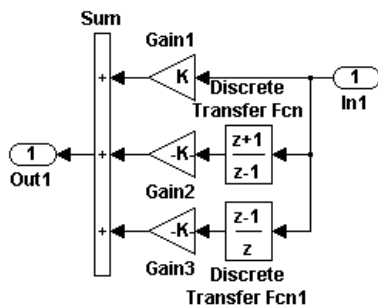


Рис. 3. PID-регулятор

Передавальна функція (5) виходить з передавальної функції аналогового PID-регулятора

$W(s) = K + K_i/s + K_d s$ шляхом апроксимації похідною першого різниці і інтегрування методом трапеції. При малих кроках моделювання цифровий PID-регулятор еквівалентний аналоговому.

Якщо $K_d = 0$ ($G_3 = 0$), то отримаємо передавальну функцію PI-регулятора. Цей регулятор часто пропонують до використання в AQM системах як альтернативу RED-регулятору.

У моделі AQM системи, яка зображена на рис.4, для корекції системи використовуємо RED-регулятор. Передавальна функція RED-регулятора визначена в роботі [0] як

$$C_{red}(s) = \frac{L_{red}}{s/K + 1} = \frac{KL_{red}}{s + K}, \quad (6)$$

де $L_{red} = \frac{p_{max}}{\max_{th} - \min_{th}}$ і $K = \frac{\log_e(1-\alpha)}{\delta}$, $\alpha > 0$ – середній параметр черги, δ - частота дискретизації.

Лінійна модель RED-регулятора показана на рис. 5.

Відзначимо, що при налаштуванні цифрових PID-регулятора і RED-регулятора в інтерактивній системі MATLAB можна використовувати блок NCD (Nonlinear Control Design), який реалізує метод динамічної оптимізації для проектування систем управління. Цей інструмент, розроблений для використання з Simulink, автоматично налаштовує системні параметри (у системах на рис. 2 і 4 налаштовуються параметри регуляторів), ґрунтуючись на певних обмеженнях на тимчасові

характеристики (наприклад, час регулювання та перерегулювання для реакції на поетапний вплив) або межі для динамічної помилки неузгодженості.

Припустимо, що час слідування туди і назад $R_0(t)$ змінюється випадковим чином в межах від 220 мсек до 300 мсек, а навантаження трафіку $N(t)$ змінюється також випадковим чином в межах від 40 до 80. Такі "впливи" на систему, наведені на рис.2 і 4, можуть генерувати в інтерактивній системі MATLAB блоки Uniform Random Number.

Відзначимо, що в реальних мережах і час слідування туди і назад, і навантаження трафіку може змінюватися випадковим чином у різних межах, але для порівняння роботи розглянутих регуляторів обрані однакові "впливи", показані на рис.6, а і б.

Смність зв'язку виберемо рівною $C = 3750$ пакетів/сек, бажану довжину черги прийемо рівною $q_0 = 200$ пакетів.

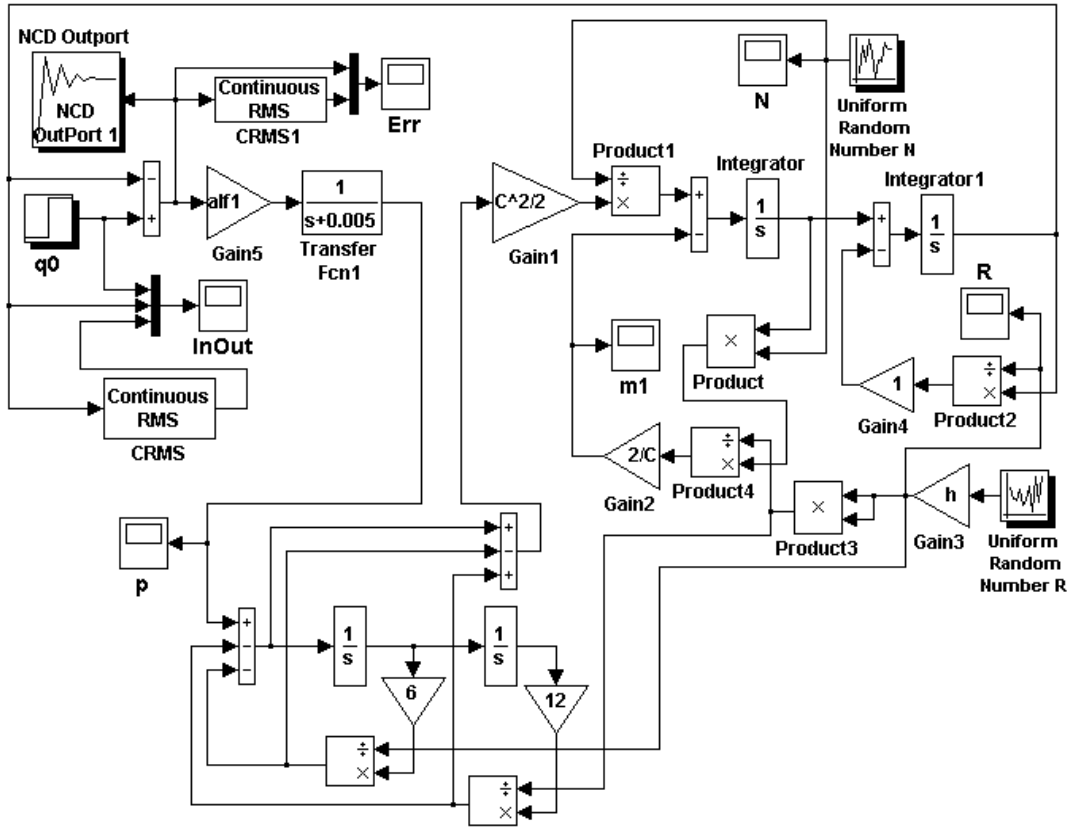


Рис. 4. Модель AQM системи, яка скорегована RED-регулятором

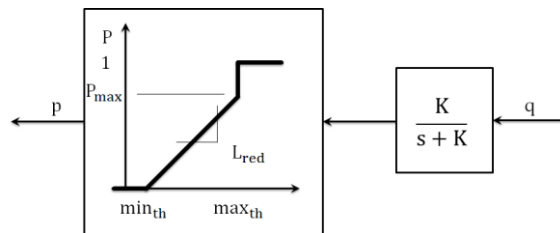


Рис. 5 .Модель RED, як послідовне з'єднання фільтру і нелінійності.

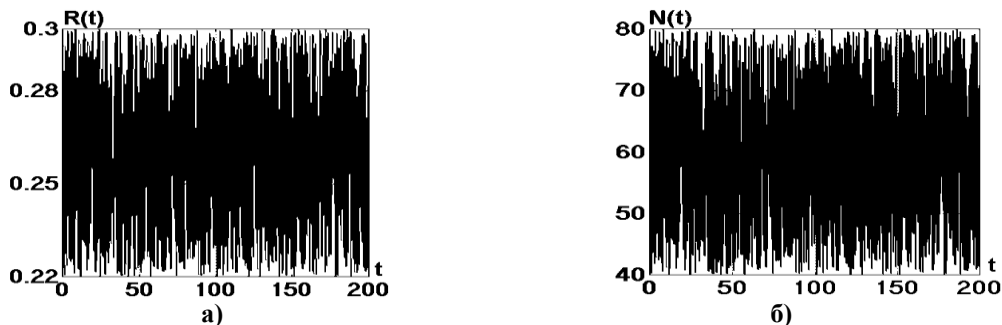


Рис. 6. Час слідування туди і назад $R_0(t)$ (а) і навантаження трафіку $N(t)$ (б)

Спочатку досліджуємо процеси в AQM системі, скоригованої PID-регулятором. Регулятор налаштовуємо так, щоб поточна довжина черги $q(t)$ була якомога ближче до бажаної довжини

черги. При цьому отримані наступні значення коефіцієнтів регулятора: $K = 6,2 \cdot 10^{-5}$; $K_i = 3,12 \cdot 10^{-5}$; $K_d = 5 \cdot 10^{-7}$. Крок дискретизації (крок квантування) h_0 обраний рівним 0,01 сек.

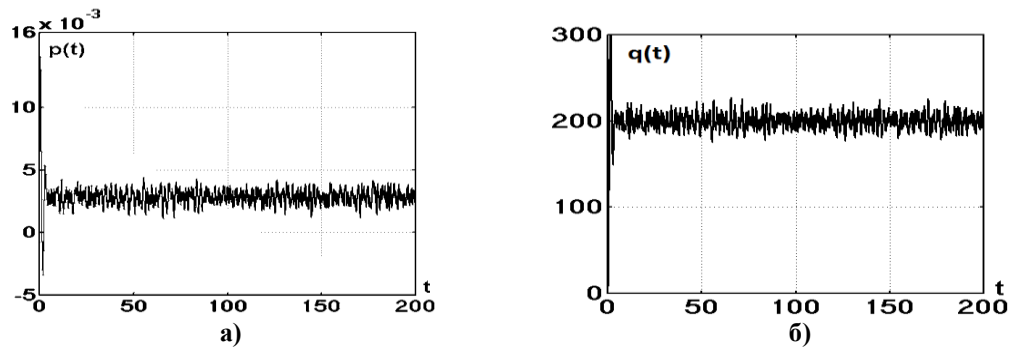


Рис. 7. Імовірність відкидання (маркування) пакетів $p(t)$ і поточна довжина черги $q(t)$ в системі (див. Рис. 2) з PID-регулятором

Процеси в AQM системі, яка скоригована PID-регулятором, наведені на рис.7, де представлені вихідна змінна PID-регулятора $p(t)$ - ймовірність відкидання / маркування пакетів (а) і вихід системи $q(t)$ - поточна довжина черги (б). Інтервал спостереження $L=200$ секунд.

поточну довжину черги біля її бажаного значення. Крім того, оскільки коефіцієнт K_d на два порядки менше, ніж інші коефіцієнти регулятора, то можна використовувати PI-регулятор. Процеси в AQM системі, скоригованої PI-регулятором з параметрами $K = 6,2 \cdot 10^{-5}$; $K_i = 3,12 \cdot 10^{-5}$, наведені на рис.8, де представлені вихідна змінна PI-регулятора $p(t)$ - ймовірність відкидання (маркування) пакетів (а) і вихід системи $q(t)$ - поточна довжина черги (б).

Дослідження системи, наведеної на рис.2, яка скоригована PID-регулятором, показують, що вихід регулятора і вихід системи є випадковими, шумоподібними змінними і регулятор підтримує

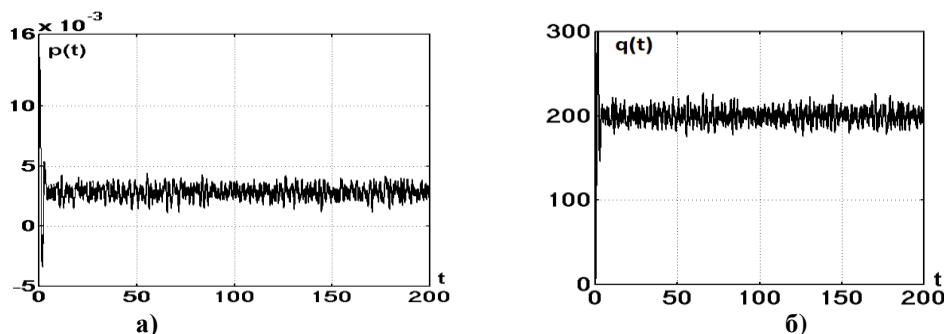


Рис. 8. Імовірність відкидання (маркування) пакетів $p(t)$ і поточна довжина черги $q(t)$ в системі (див. Рис. 2) з PI-регулятором

Досліджуємо процеси в AQM системі, яка скоригована RED-регулятором. Оптимальні параметри RED-регулятора отримані в роботі [0]: $L_{red} = 1.84 \cdot 10^{-4}$; $K = 0.005$. Тому в системі на рис.4 коефіцієнт $alf1$ дорівнює $1.84 \cdot 10^{-4} \cdot 0.005$.

Процеси в AQM системі, скоригованої RED-регулятором, наведені на рис.9, де представлені вихідна змінна RED-регулятора $p(t)$ - ймовірність відкидання (маркування) пакетів (а) і вихід системи $q(t)$ - поточна довжина черги (б).

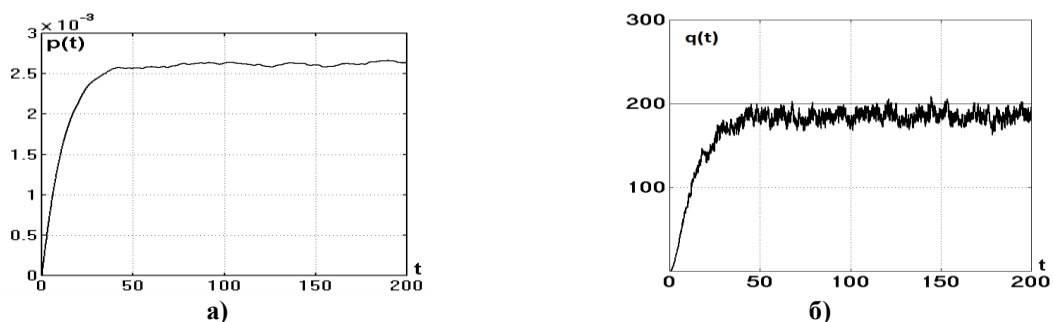


Рис. 9. Імовірність відкидання (маркування) пакетів $p(t)$ і поточна довжина черги $q(t)$ в системі (див. Рис. 4) з RED-регулятором

Висновки й перспективи подальших досліджень

Порівнюючи процеси в досліджуваних системах можна укласти, що AQM система, яка скоригована RED-регулятором, має більш гірші характеристики по точності та швидкодії, ніж

Література

1. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп / Пер. с англ. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с. 2. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. М. : СОЛОН-Пресс. – 2003. – 576 с. 3. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. - СПб.: Питер, 2001. - 480 с. 4. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. - М.: Машиностроение, 1986. - 448с. 5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH.- СПб.: БХВ-Петербург, 2003.- 736 с. 6. Heying Z., Baohong L., and Wenhua D. "Design of a robust active queue management algorithm based on feedback compensation". Proceedings of ACM/SIGCOMM'2003, pp. 277-285. 7. 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. 8. Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Gong W.B. "Analysis and design of controllers

системы, які скориговані PID і PI регуляторами. Поточна довжина черги повторює задану довжину черги (бажане значення черги) з великою помилкою і перехідний процес системи, скоригованої RED-регулятором, займає майже 50 сек.

for AQM routers supporting TCP flows". IEEE/ACM Transactions on Automatic Control, vol. 47, no.6, pp. 945-959, June 2002. 9. 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. 10. Ryu S., Ryu B., Jeong M., Park S. "PI-PD-controller for adaptive and robust active queue management for Internet congestion control" SIMULATION, Vol.81, Issue 6, June 2005. pp.437-459. 11. Ryu, S., Rump C. "Application of a PID feedback control algorithm for adaptive queue management to support TCP congestion control". Journal of Communications and Networks 6 (2), 2004, pp. 133-146. 12. Wu W., Ren Y., Shan X. "A self-configuring PI controller for active queue management". Proc. of APCC'2001, Tokyo, Japan, Sept.16-20, 2001, pp. 368-371. 13. Yanfei F., Fengyuan R., Chuang L. "Design a PID controller for active queue management". Proceedings of ISCC'2003, pp. 985-990.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЬЮ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ TCP/IP СЕТЕЙ

Владимир Иванович Гостев (д-р техн. наук, профессор)

Вадим Дмитриевич Кротов

Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина

Проблема обеспечения качества обслуживания в сетях, работающих на основе стека протоколов TCP/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. В этой статье исследованы процессы в системах активного управления очередью Active Queue Management (AQM- системах) при использовании PID-, PI- и RED-регуляторов при переменных параметрах TCP/IP сети (случайное изменение нагрузки трафика – случайное изменение числа сессий TCP и случайное изменение времени прохождения туда и обратно (round trip time RTT)) на основе интерактивной системы MATLAB.

Ключевые слова: AQM-системы; сети TCP/IP; PID-, PI- и RED-регуляторы.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF QUEUE MANAGEMENT ALGORITHMS UNDER THE TCP/IP NETWORKS VARIABLE PARAMETERS

Volodymyr I. Hostev (Doctor of Technical Sciences, Professor)

Vadym D. Krotov

Military Institute of Telecommunications and Informatization, Kyiv, Ukraine

The problem of providing quality of service in networks, operating on the basis of the TCP/IP protocols stack, it has been and remains relevant for protocols and network equipment developers, service providers and end users. At all levels of the network actively using buffering and packets queuing management mechanisms,

including adaptive and designed with one hand, to serve traffic bursts with minimal packets losses, and the other – to provide sufficient bandwidth and acceptable to the end user time delays. In this article, the processes in the active queue management systems (AQM- systems) using PID-, PI- and RED-controllers under variable parameters of TCP/IP network (random change of traffic load – random change in the number of TCP sessions and random change of round trip time RTT) based on MATLAB interactive system were analyzed.

Keywords: AQM-system; TCP/IP Networks; PID-, PI- and RED-regulators.

References

- 1. Dorf R.** (2002), Modern control systems. Trans. from Eng. 3rd ed. [Sovremennyye sistemy upravleniya. Per. s angl. 3-e izd.], Laboratoria Bazovyh Znaniy i Moscow, 832 p.
- 2. D'iakonov, V.** (2003) MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 in mathematics and modeling. Full user's guide. [MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 v matematike i modelirovani. Polnoe rukovodstvo pol'zovatel'ia.], SOLON-Press, Moscow, 576 p.
- 3. D'iakonov, V.** (2001) Mathematical packages of expansion of MATLAB. Special directory. [Matematicheskie pakety rasshireniia MATLAB. Specialniy Spravochnik.], Piter, St.Petersburg, 480 p.
- 4. Kuo. B.** (1986) Theory and design of digital control systems. [Teoriia i proektirovanie cifrovyyh sistem upravleniya.], Mashinostroenie, Moscow, 448 p.
- 5. Leonenkov. A.** (2003) Indistinct modeling in the environment of MATLAB and fuzzyTECH. [Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH.], BHV-Peterburg, St.Petersburg, 736 p.
- 6. Heying. Z.**, Baohong L., and Wenhua D. (2003), "Design of a robust active queue management algorithm based on feedback compensation". Proceedings of ACM/SIGCOMM'2003, pp. 277-285.
- 7. Holot C.V., Misra V., Towsley D., Gong W.B.** (2001), "A Control Theoretic Analysis of RED," in Proceedings of IEEE/INFOCOM, pp. 1510-1519.
- 8. Holot C.V., Misra V., Towsley D., Gong W.B.** (2002), "Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows". IEEE/ACM Transactions on Automatic Control, vol. 47, no.6, pp. 945-959.
- 9. Holot C.V., Misra V., Towsley D., Gong W.B.**, (2001), "On Designing Improved Controllers for Routers Supporting TCP Flows", in Proceedings of IEEE INFOCOM'2001, pp. 1726-1734.
- 10. Ryu S., Ryu B., Jeong M., Park S.** (2005), "PI-PD-controller for adaptive and robust active queue management for Internet congestion control" SIMULATION, Vol.81, Issue 6, pp.437-459.
- 11. Ryu, S., Rump C.** (2004), "Application of a PID feedback control algorithm for adaptive queue management to support TCP congestion control". Journal of Communications and Networks 6 (2), pp. 133-146.
- 12. Wu W., Ren Y., Shan X.** (2001), "A self-configuring PI controller for active queue management". Proc. of APCC'2001, Tokyo, Japan, pp. 368-371.
- 13. Yanfei F., Fengyuan R., Chuang L.** (2003) "Design a PID controller for active queue management". Proceedings of ISCC'2003, pp. 985-990.

Отримано: 17.09.2015 року