

О. В. НЕВДАЧИНА А. П. ПОЛОНЕВИЧ А. С АРТЮЩИК

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА С ДВУМЯ ВХОДАМИ В СИСТЕМЕ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЬЮ ПАКЕТОВ В СЕТЯХ TCP/IP

Государственный университет телекоммуникаций, Киев

*В статье представлен подход к решению проблемы перегрузок в сетях TCP/IP. Предложен нечеткий регулятор с двумя входами для системы активного управления очередью пакетов в сетях TCP/IP и исследовано его использование в данных системах при случайном изменении нагрузки трафика. Предложенный регулятор имеет два входа, один из которых это значение разницы между текущей длиной очереди, а второй – разница между текущим уровнем использования буфера. На выходе нечеткого регулятора вычисляется значение вероятности отбрасывания пакетов. Математическая модель системы активного управления очередью, которая исследуется, представлена в интерактивной системе MATLAB, где так же продемонстрированы процессы, происходящие в данной системе при случайном изменении нагрузки трафика. Результаты исследований показывают, что AQM-система с нечетким регулятором с двумя входами достаточно стабильно поддерживает заданную текущую длину очереди при достаточно малых значениях вероятности отбрасывания/маркировки пакетов (при желаемом размере очереди  $q_0 = 200$  пакетов, среднее значение вероятности отбрасывания/маркировка не больше  $3,5 \cdot 10^{-3}$  или меньше 0,35% пакетов отбрасывается или маркируется из общего числа поступающих пакетов). Полученные в работе результаты позволяют повысить эффективность функционирования и эксплуатации сетей TCP/IP в результате повышения качества передачи данных. Это происходит за счет внедрения предложенного регулятора при проектировании новых более эффективных маршрутизаторов для сетей и минимизации задержки информации.*

**Ключевые слова:** нечеткий регулятор, TCP/IP, активное управление очередью, AVO, AQM, очередь пакетов, MATLAB.

### Введение

Для решения проблем уменьшения высокой задержки из-за полных очередей в сетях TCP/IP применяется стратегия Активное управление очередью – Active Queue Management (AQM). При AQM уведомления о перегрузке производятся отбрасыванием (или маркировкой) поступающих пакетов прежде, чем очереди маршрутизаторов станут полными. Другими словами, AQM использует принцип обратной связи: оконечные хосты реагируют на отбрасывание маркировки пакетов в очередях маршрутизатора, уменьшая их скорость передачи.

Традиционные методы, применяющиеся в сетях TCP/IP не могут полностью решить проблему борьбы с перегрузками с удовлетворительным качеством, в то время как нечеткая логика обеспечивает неаналитический подход к проектированию динамических и быстрых

схем управления для решения проблемы. Применение нечетких регуляторов, то есть регуляторов работающих на базе нечеткой логики, для управления различными объектами, демонстрирует их высокую эффективность и в ряде случаев существенные преимущества перед линейными цифровыми регуляторами [1].

Задача данной статьи – исследование работы AQM-системы при использовании в качестве регулятора перегрузок нечеткого регулятора с двумя входами. Для оценки динамики работы будет проведено измерение текущей длины очереди и вероятности маркировки отбрасывания пакетов при изменяющейся случайным образом длине очереди пакетов.

### 1. Описание работы нечеткого регулятора с двумя входами

На рис. 1 представлен нечеткий регулятор, который имеет два входа:

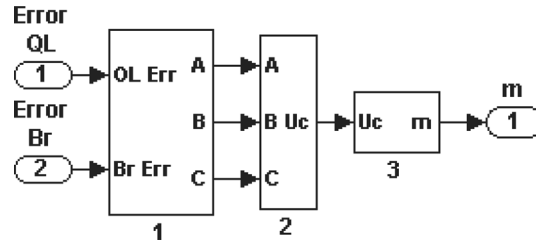


Рис. 1. Блок схема нечеткого регулятора с двумя входами

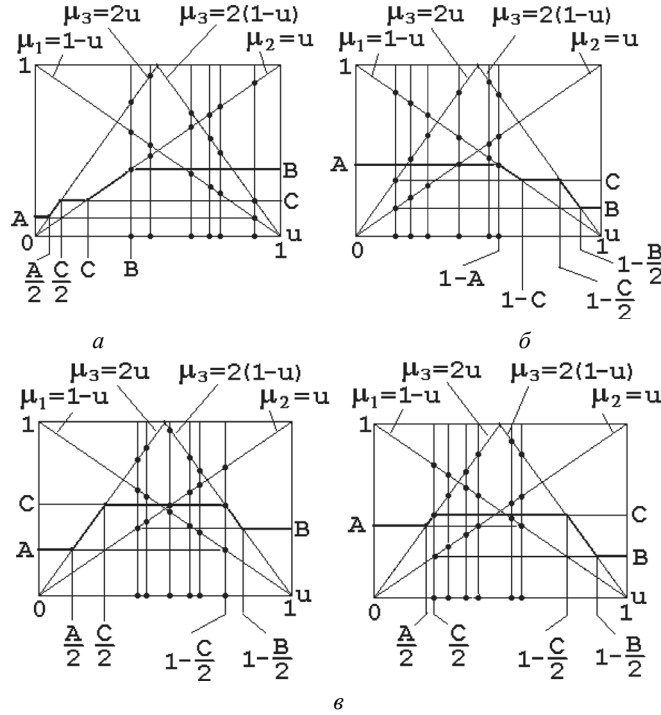


Рис. 2. Универсальные множества

1. Разницу между текущей длиной очереди (queuelength – QL) и желаемым значением длины очереди (target queue length – TQL)

2. Разницу между текущим уровнем использования буфера (bufferusage ratio – Br) и желаемым уровнем использования буфера (target buffer usage ratio – TBr)

Данный регулятор имеет один выход – вероятность отбрасывания пакетов (packet-dropping probability – Pd). Регулятор вычисляет вероятность отбрасывания пакетов  $Pd \equiv m$ , согласно первой разнице (Error QL), второй разнице (Error Br) и набору нечетких правил. Регулятор представим в виде последовательного соединения трех блоков (см. рис. 1): формирователя величин  $A(t)$  и  $B(t)$  (блок 1), блока сравнения величина  $A$  и  $B$  и расчета  $u_c$  (блок 2) и блока нормировки выходной переменной (блок 3).

Для упрощения проектирования регулятора примем, что блоки 1 и 2 имеют идентичные

треугольные функции принадлежности с тремя термами, которые расположены на универсальном множестве  $[0, 1]$  (см. рис. 2, где показаны три конфигурации «результатирующей фигуры»):

$$A \leq C \leq B, A \geq C \geq B \text{ и } \begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases} \quad (1)$$

$$u_c = \frac{B/2 + (A^3 - 4B^3 + 3C^3)/24}{B + (A^2 - 2B^2 + C^2)/4} \text{ при } A \leq C \leq B. \quad (2)$$

$$u_c = \frac{A/2 - (2A^2 - B^2 - C^2)/4 + (4A^3 - B^3 - 3C^3)/24}{A - (2A^2 - B^2 - C^2)/4} \text{ при } A \geq C \geq B. \quad (3)$$

$$u_c = \frac{C/2 + (B^2 - C^2)/4 + (A^3 - B^3)/24}{C + (A^2 + B^2 - 2C^2)/4} \quad (4)$$

при  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$

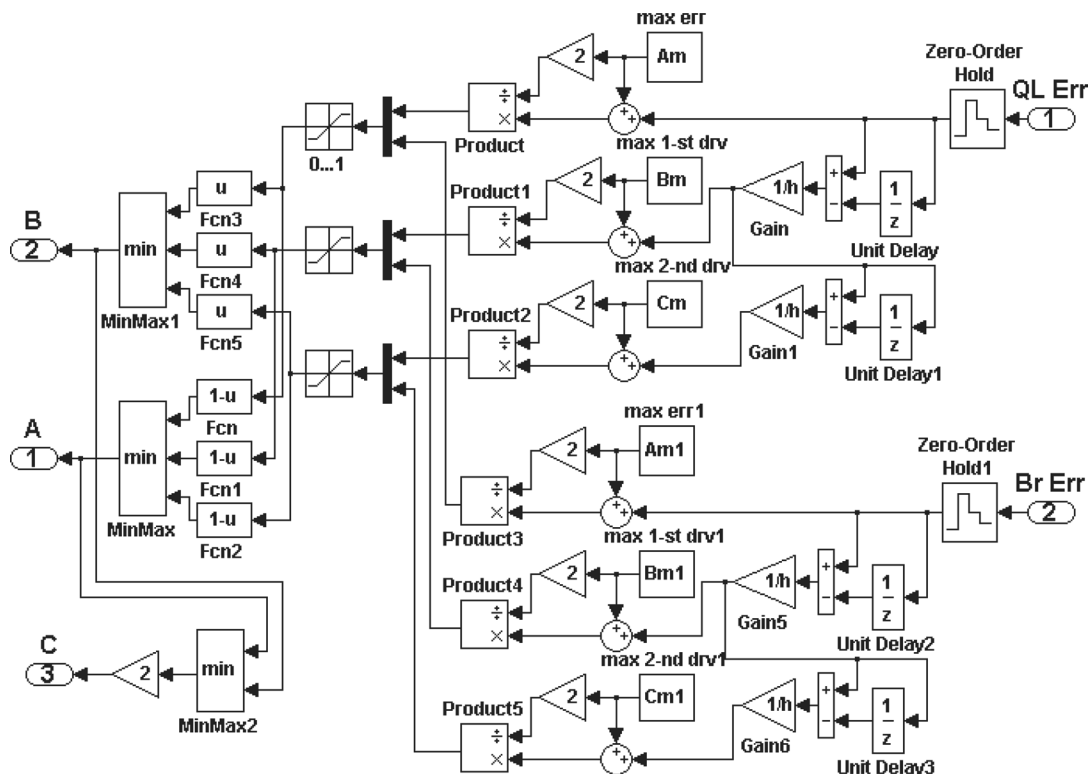


Рис. 3. Формирователь величин

**Формирователь величин  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$**  данного регулятора показан на рис. 3.

В формирователе ошибки рассогласования **QL Error** и **Br Error** квантуются аналого-цифровыми преобразователями АЦП и АЦП1 (**Zero-OrderHold** и **Zero-Order Hold1**) с шагом квантования (шагом поступления данных в нечеткий регулятор)  $h$ . Квантованные ошибки  $\theta_{ql}(k)$  и  $\theta_{br}(k)$  с выхода АЦП и АЦП1, их первая  $\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)] / h$  и вторая  $\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)] / h$  разности подаются на вход блока нормировки входных переменных. На выходе блоков **Product** – **Product5** структурной схемы формирователя величин **A(t)**, **B(t)** и **C(t)** получаем переменные  $u_i$  (соответственно  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$ ). Элементами ограничения (**Saturation**) моделируем универсальное множество  $U = [0, 1]$ , на которое поступают переменные  $u_i, i = 1, 6$ . В блоках **Fcn**, **Fcn1**, **Fcn2** записываем аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_1(u)$ , а в блоках **Fcn3**, **Fcn4**, **Fcn5** – аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_2(u)$ . На выходе блоков **Fcn**, **Fcn1**, **Fcn2** получаем переменные  $\mu_1(u_i)$  (соответственно  $\mu_1(u_1), \mu_1(u_2), \mu_1(u_3), \mu_1(u_4), \mu_1(u_5), \mu_1(u_6)$ ), а на выходе блоков **Fcn3**, **Fcn4**, **Fcn5** получаем

переменные  $\mu_2(u_i)$  (соответственно  $\mu_2(u_1), \mu_2(u_2), \mu_2(u_3), \mu_2(u_4), \mu_2(u_5), \mu_2(u_6)$ ).

**Блок сравнения величин  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$  и расчета  $u_c$**  (блок 2 на рис. 1) проектируется на основании формул (2), (3), (4) и показан на рис. 4.

На выходе делителя **Product** формируется величина  $u_c$  на основании формулы (2) при  $A \leq C \leq B$ . На выходе делителя **Product1** формируется величина  $u_c$  на основании формулы (3) при  $A \geq C \geq B$ . На выходе делителя **Product2** формируется величина  $u_c$  на основании формулы (4) при  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$ .

Переключатели **Switch1** замыкают верхние контакты при условии  $A \leq C \leq B$ , когда на средних контактах этих переключателей сигналы положительные (в блоках **Switch1** параметр **Threshold** = 0.000001). При условии  $A \geq C \geq B$ , когда на средних контактах переключателей **Switch** и **Switch1** сигналы отрицательные, переключатели замыкают нижние контакты.

Переключатели **Switch2** и **Switch3** замыкают верхние контакты при условии  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$ , когда на средних контактах этих переключате-

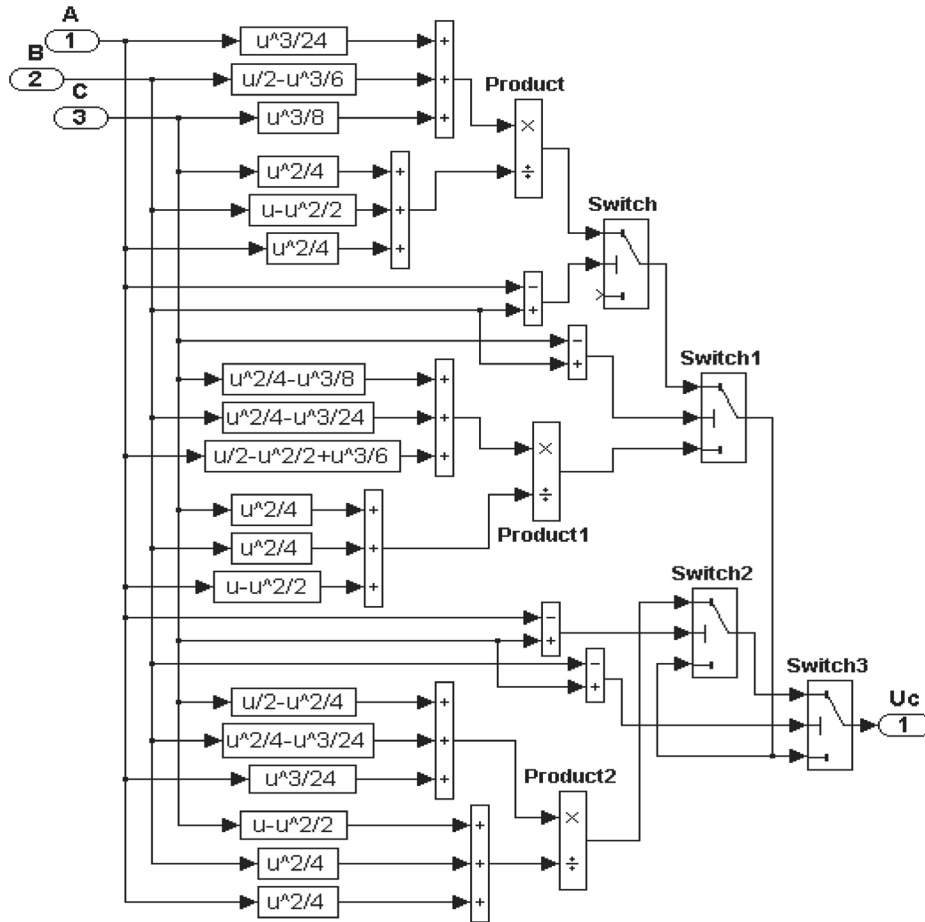


Рис. 4. Блок сравнения величин

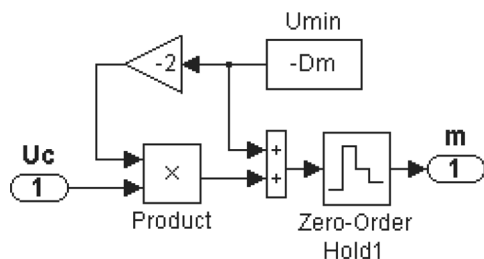


Рис. 5. Блок нормировки выходной переменной

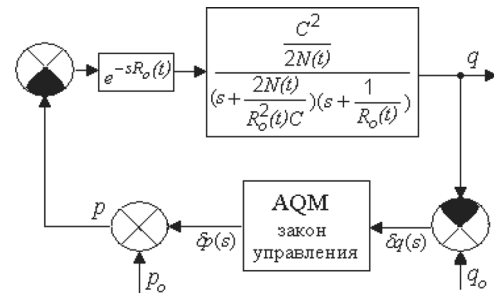


Рис. 6. Общая схема системы активного управления очередью пакетов

лей сигналы положительные (в блоках Switch2 и Switch3 параметр Threshold = 0.000001).

**2. Исследование работы системы Активного управления очередью пакетов с предложенным регулятором.**

Для анализа работы системы активного управления очередью пакетов ее можно представить как систему управления с обратной связью [2–3], где в качестве AQM-закона управления может быть использован любой регулятор. Его основная задача заключается в поддержании очереди пакетов на минимальном уровне, не допуская наступления перегрузки. Общая схема данной системы представлена на рис. 6 [4].

Динамика объекта описывается передаточной функцией, которая представляет собой отношение по Лапласу переменной «длина очереди» к переменной «вероятность отбрасывания маркировки пакета» и имеет вид:

$$G(s) = P(s)e^{-sR_o} = \frac{C^2}{2N} \left( s^2 - \frac{6}{R_o} s + \frac{12}{R_o^2} \right) \quad (5)$$

$$= \frac{C^2}{\left( s + \frac{2N}{R_o^2 C} \right) \left( s + \frac{1}{R_o} \right) \left( s^2 + \frac{6}{R_o} s + \frac{12}{R_o^2} \right)}$$

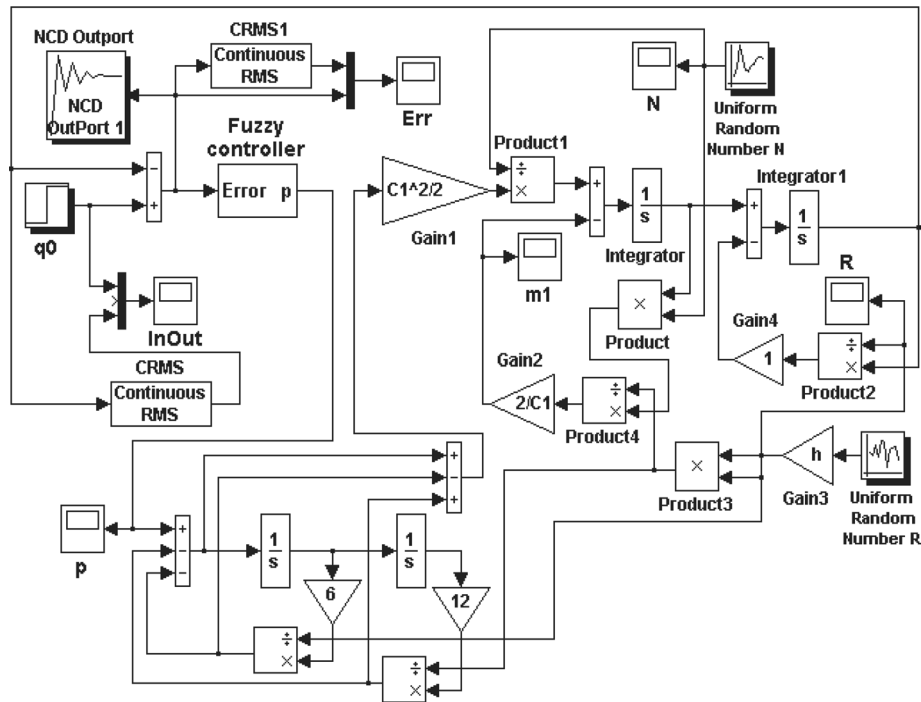


Рис. 7. Модель AQM системы

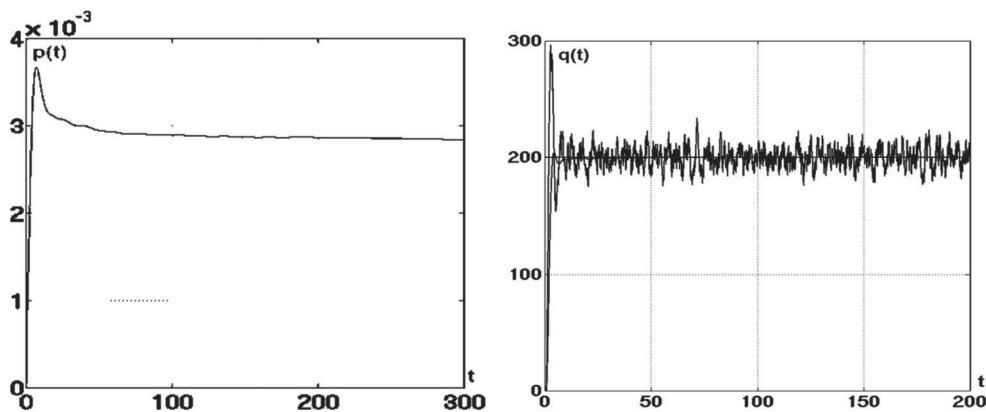


Рис. 8. Вероятность отбрасывания/маркировки пакетов  $p(t)$  и текущая длина очереди  $q(t)$

где  $C$  – емкость связи (пакеты/сек)  $R_0$  – время следования туда и обратно,  $N$  – коэффициент нагрузки (число TCP сессий). Передаточную функцию звена запаздывания аппроксимируется с помощью функции Паде второго порядка [5].

На рис. 7 представлена AQM-система с нечетким регулятором (Fuzzy Controller) как система с переменными параметрами при случайном изменении нагрузки трафика (случайном изменении числа сессий TCP и случайном изменении времени следования туда и обратно – round trip time RTT) на основе интерактивной системы MATLAB [6].

В интерактивной системе MATLAB можно представить модель объекта управления соединением звеньев с изменяющимися случайным

образом параметрами  $N(t)$  и  $R(t)$ . Усилительное звено  $C^2 / 2 / N(t)$  моделируется блоками усилителем Gain1 и делителем Product1, на верхний вход которого поступает сигнал  $N(t)$ . Аперриодическое звено  $[s + 2N(t) / R_0^2(t) / C]$  моделируется интегратором Integrator, охваченным отрицательной обратной связью, которая включает умножитель Product, делитель Product 4 и усилителя Gain2. Аперриодическое звено  $[s + 1 / R_0(t)]$  моделируется интегратором Integrator1, делителем Product 2 и усилителем Gain4.

Нечеткий регулятор настраивается на минимальную динамическую ошибку  $\theta(t) = q_0 - q(t)$ , Шаг квантования (шаг поступления данных в нечеткий регулятор)  $h = 0,01c$ . Желаемый размер очереди выбран 200 пакетов.

При настройке нечеткого регулятора были получены следующие параметры:

$$\text{alf0} = 10^{(-5)}; h = 0.01; Am = 196; \\ Bm = 315; Dm = 2800$$

Процессы в AQM системе, скорректированной рассмотренным FC-регулятором с идентичными входными и выходными треугольными функциями принадлежности представлены на рис. 8.

### Заключение

Предложен нечетко регулятор с двумя входами для систем активного управления очередью и исследована система с данным регулятором. Нечеткий регулятор обеспечивает высокое быстродействие и установку очереди

пакетов максимально приближенную к желаемой.

Проведенные исследования показывают, что AQM-система с нечетким регулятором с двумя входами достаточно стабильно поддерживает заданную текущую длину очереди при достаточно малых значениях вероятности отбрасывания/маркировки пакетов (при желаемом размере очереди  $q_0 = 200$  пакетов, среднее значение вероятности отбрасывания/маркировка не больше  $3,5 \cdot 10^{-3}$  или меньше 0,35% пакетов отбрасывается или маркируется из общего числа поступающих пакетов). Поэтому, предложенный нечеткий регулятор целесообразно применять для предотвращения перегрузки на сеть с пакетной передачей данных.

### Литература

1. Невдачина О. В., Полоневич А. П. Застосування нечіткого регулятора в системі активного управління чергою. – u-conferences.org/CSPS, 2015.
2. 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.
3. 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.
4. Гостев В. И., Кунах, Н. И., Невдачина, О. В., Кучер С. В. Активное управление очередью пакетов в IP-сетях на базе нечеткой логики // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» COMINFO'2010 – Livadia. 04–08 жовтня 2010 р. Крим, Ялта-Лівадія. – С. 65–66.
5. Гостев В. И., Кунах, Н. И., Невдачина, О. В., Артющик, А. С. Аппроксимация комплексной передаточной функцией звена ПАДЕ n-го порядка (приближением ПАДЕ n-го порядка) звена чистого запаздывания для AQM-систем // Сучасна спеціальна техніка. – 2013. – №. 1. – С. 79–85.
6. Гостев В. И., Скуртов С. Н., Невдачина О. В., Кротов В. Д. Нечеткое активное управление очередью в узко-специализированной радиосвязи // Сучасна спеціальна техніка. – 2011. – №. 3. – С. 66–79.
7. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.

### References

1. Nevdachyna O. V., Polonevych A. P. Applying fuzzy controller in the system of active queue management. – U-conferences. org/CSPS, 2015.
2. 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.
3. 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.
4. Gostev V. I., Kunakh N. I., Nevdachyna O. V., Kucher S. V. Active queue management packets in IP-networks based on fuzzy logic // VI International Scientific Conference «Modern information and communication technologies» COMINFO'2010 – Livadia. 04–08 October 2010. Crimea, Yalta Livadiya. – S. 65–66.
5. Gostev V. I., Kunakh N. I., Nevdachyna O. V., Artyushchik A. S. Approximation of the complex transfer function of the link PADE n-th order (PADE approximation of n-th order) link pure delay for AQM-systems // Modern special equipment. – 2013. – №. 1. – P. 79–85.
6. Gostev V. I., Skurtov S. N., Nevdachyna O. V., Krotov V. D. Fuzzy active queue management in a highly specialized radio communications // Modern special equipment. – 2011. – №. 3. – P. 66–79.
7. Gostev V. I., Design of fuzzy controllers for automatic control systems. – SPb.: BHV-Petersburg, 2011. – 416 p.

Поступила  
11.07.2016

После доработки  
20.07.2016

Принята к печати  
15.09.2016

*O. V. Nevdachyna, A. P. Polonevych, A. S. Artyuschyk*

## STUDY THE EFFECTIVENESS APPLICATIONS OF FUZZY CONTROLLER WITH TWO ENTRANCES IN THE SYSTEM OF ACTIVE QUEUE MANAGEMENT THE PACKETS IN TCP/IP NETWORKS

*University of Telecommunications Kiev*

*The paper presents an approach to solving the overloading problem in TCP/IP networks. Offered fuzzy controller with two inputs for system of active queue management packages in TCP/IP networks, and investigated its use in these systems with a random change of traffic load. Proposed controller has two inputs, one of which is the value of the difference between the current queue length and the second – the difference between the current level of usage of the buffer. The output of the fuzzy controller calculates the probability of discarding packet.*

*Mathematical model system of active queue management that is studied is presented in an interactive MATLAB system, in wherein also is demonstrated the processes occurring in the system with a random change of traffic load. The research results show that the AQM-system with fuzzy controller with two entrances stable enough maintains the desired current length the queue for sufficiently small values of the probability of dropping/markings packets (at acceptable size of queue  $q_0 = 200$  packets, the average probability of dropping / marking is not more than  $3,5 \cdot 10^{-3}$  or less 0,35% packets is discarded or marked from the total number of incoming packets). The results obtained will help improve the efficiency of the functioning and operation of TCP / IP networks by increasing data transmission quality. this happens due introduction of the proposed controller at the design of new, more efficient routers for networks to minimize the delay of information.*

**Keywords:** fuzzy control, TCP/IP, an active queue management, AAO, AQM, packet queue, MATLAB.

НИР 0114U000398



**Невдачина Ольга.** Доцент кафедры Коммутационных систем Государственного университета телекоммуникаций. В 2010 году окончила Государственный университет информационно - коммуникационных технологий и получила степень магистра. В 2014 году получила степень кандидата технических наук в Государственном университете телекоммуникаций, Киев, Украина. Основное направление научной деятельности - системы активного управления очередью в сетях TCP/IP.

**Nevdachina Olga** associate professor of department of switching systems of the State University of Telecommunications. In 2010 graduated from the State University of Information and Communication Technology and received a master's degree. In 2014, earned a Ph.D. in the State university of Telecommunications, Kiev, Ukraine. The main direction of scientific activity-system active queue management in TCP/IP networks.



**Полоневич Андрей.** Инженер ЦКУ «МТС Украина». В 2010 году окончил Государственный университет информационно - коммуникационных технологий и получил степень магистра. В 2014 году получил степень кандидата технических наук в Государственном университете телекоммуникаций, Киев, Украина. Основное направление научной деятельности - системы активного управления очередью в сетях TCP/IP

**Polonevych Andrii** engineer MCC "MTS Ukraine". In 2010 graduated from the State University of Information and Communication Technology and received a master's degree. In 2014, earned a Ph.D. in the State university of Telecommunications, Kiev, Ukraine. The main direction of scientific activity-system active queue management in TCP/IP networks.



**Артющик Александр.** В 1992 г. окончил Киевское высшее инженерное радиотехническое училище ПВО имени Покрышкина, Киев, Украина. В настоящее время является аспирантом государственного университета телекоммуникаций. Основное направление научной деятельности - алгоритмы оптимизации для активного управления очередью в TCP/IP.

**Artyuschyk Oleksandr** received the M.S. degree from the Kiev Military Academy of Electronic Engineering named after Pokryshkin, Kyiv, Ukraine, in 1992. Currently he is postgraduate student of state University of telecommunications. His research interests include Optimization algorithms for active queue management in TCP/IP.