

УДК 62-55:681.515

к.т.н., с.н.с. Гостев В.В. (КНУ)  
к.т.н., доц. Савков П.А. (ВИКНУ)  
к.т.н., доц. Пампуха И.В. (ВИКНУ)  
Пусан В.В. (ВИКНУ)

## АРХИТЕКТУРА НЕЧЁТКОГО FREM-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НОРМ НЕСООТВЕТСТВИЯ

*В статье рассматривается архитектура нечеткого FREM-регулятора, который обнаруживает норму несоответствия, сравнивая мгновенную длину очереди с ее предыдущей выбранной (дискретной) величиной и имеет треугольные функции принадлежности заданной формы. Подробно описаны и заданы нечеткие правила, топология моделированной сети. Представлена архитектура, а также правила функционирования регулятора. Приведены функции принадлежности для регулятора. Заданная топология моделирования сети позволяет получить экспериментальные осциллограммы длин очередей для 100 и 300 источников. Рассчитаны значения среднеквадратичного отклонения и приведены значения задержек разного количества источников для FREM-, PID-, REM-регуляторов. При этом FREM-алгоритм имеет значительно меньшие среднеквадратичные отклонения от желаемой длины очереди  $s_e$  и средние задержки пакетов. Описана возможность использования мгновенной длины очереди для оценки переходной характеристики, значения потерь пакетов среди других заданных AQM-алгоритмов.*

*Ключевые слова: FREM-регулятор, архитектура, база правил, функции принадлежности, переходной характеристики, среднеквадратичным отклонением.*

**Введение.** Увеличение количества пользователей Интернета очень часто указывает на проблему борьбы с перегрузками. Они происходят, когда количество данных, введенных в сеть, больше чем количество данных, которые доставляются по назначению. При пакетной передаче источники данных должны уменьшить скорость передачи при наличии потери пакетов. В работе описан нечеткий FREM-регулятор. Представлена архитектура этого регулятора. Описаны правила функционирования регулятора. Приведены функции принадлежности для регулятора. Задана топология моделирования сети. Полученные экспериментальные осциллограммы длин очередей для 100 и 300 источников. Получены

значения среднеквадратичного отклонения и приведены значения задержек разного количества источников для FREM-, PID-, REM-регуляторов.

**Постановка задачи.** Основной задачей REM-метода является возможность получить высокое использование канала связи, низкие потери пакетов и малую задержку очереди буфера. REM использует цену перегрузки, которая зависит от таких параметров как потери пакетов и длина очереди. Метод REM производит выборку очереди маршрутизатора через заданное время и обновляет параметр цены перегрузки, для уменьшения несоответствия между скоростью прибытия пакетов и скоростью отправки пакетов в линии (разница между запросом и нормой сервиса), а также любое несоответствие размера очереди (разницу между фактической длиной очереди и ее желаемым значением).

**Анализ полученных результатов.** Когда входящий трафик выше, чем пропускная способность канала связи (положительная норма несоответствия) за определенный интервал времени, то большинство пакетов оказываются в буфере маршрутизатора, тем самым увеличивая ее. И наоборот, отрицательная норма несоответствия - уменьшает длину очереди маршрутизатора. Таким образом, REM обнаруживает норму несоответствия, сравнивая мгновенную длину очереди с ее предыдущей выбранной (дискретной) величиной.

FREM-метод активного управления очередью представляет собой нечеткий регулятор на базе REM-алгоритма и предназначен для изменения цены маркировки/отбрасывания очереди буфера, что позволяет динамически отбрасывать пакеты, уменьшать задержку, удерживать размер буфера вокруг желательного уровня и предотвращать переполнение буфера маршрутизатора [1-4].

Данный FLC-метод является статическим алгоритмом со статическим нечетким правилом и статическими параметрами в функциях принадлежности, что способствует повышению эффективности индикации перегрузок буфера и, как результат, метод FREM более адаптивен к изменениям таких параметров трафика как объем и колебания. Также данный регулятор позволяет эффективно обнаружить и управлять начинающимися и текущими перегрузками, адаптивно поддерживать желательный уровень длины очереди, гладкие и низкие нормы потерь пакетов для каждого потока при сглаживании пульсирующих источников.

Оценка цены вероятности отбрасывания/маркировки пакетов, на которой основан нечеткий FREM-регулятор, представляет две входные переменные в текущем  $p_i(t+1)$  и предыдущем  $p_i(t)$  дискретных интервалах. Основываясь на значениях этих переменных выборки на выходе, нечеткий регулятор вырабатывает оценку вероятности отбрасывания пакетов DPV (*Drop probability value*). На рис. 1 показана схема нечеткого регулятора для FREM-метода.



Рис. 1. Архитектура нечеткого FREM-регулятора

Допустим, что нечеткий FREM-регулятор имеет  $n$  входных переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Входной вектор  $X$  определен как  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ . Тогда, база правил будет состоять из  $k$  следующих правил:

- 1) Rule 1: IF  $X = (A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n}), THEN y = B_1$
- 2) Rule 2: IF  $X = (A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2n}). THEN y = B_2$
- 3) Rule<sup>k</sup>: IF  $X = (A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{kn}), THEN y = B_k$

где  $A_{ij}$  и  $B_{ij}$  нечеткие множества лингвистических переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и  $y$ , соответственно. Значение выходной функции  $f(X)$  нечеткого FREM-регулятора может быть вычислено по формуле [1]:

$$f(X) = \sum_{j=1}^k y_o^j \prod_{i=1}^n \mu_i^j(x_i) / \sum_{j=1}^k \prod_{i=1}^n \mu_i^j(x_i), \quad (1)$$

где  $\mu(x)$  - функция принадлежности для нечетких множеств.  $y_o^j$  - центр тяжести выходного нечеткого множества  $B_j$  в  $j$ - том правиле.

Терм-множество входной лингвистической переменной  $p_i(t+1)$  можно определить, как:

$$p_i(t+1) = \{NLS, NVL, NL, NS, ZO, PS, PL, PVL, PLS\} \quad (2)$$

А для предыдущего интервала  $p_i(t)$ :

$$p_i(t) = \{NLS, NVL, NL, NS, ZO, PS, PL, PVL, PLS\}, \quad (3)$$

где NLS, NVL, NL, NS, ZO, PS, PL, PVL, PLS - значения вероятности отбрасывания/маркировки пакетов в FREM-регуляторе:

- 1) NLS – отрицательное наибольшее;
- 2) NVL – отрицательное очень большое;
- 3) NL – отрицательное большое;
- 4) NS – отрицательное малое;
- 5) ZO – нулевое;
- 6) PS – положительное малое;
- 7) PL – положительное большое;
- 8) PVL – положительное очень большое;
- 9) PLS – положительное наибольшее.

На рис. 2 и 3 приведены функции принадлежности для входных лингвистических переменных.

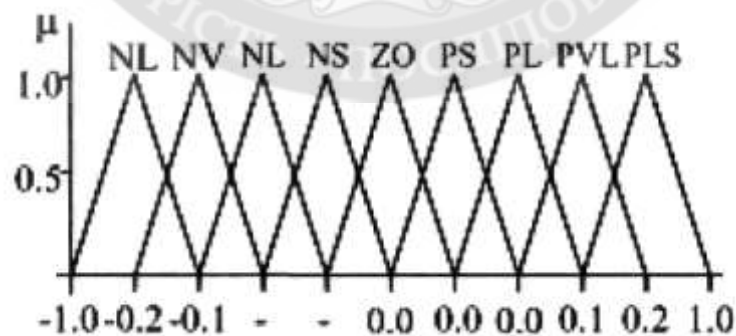


Рис. 2. Функции принадлежности для  $p_i(t+1)$

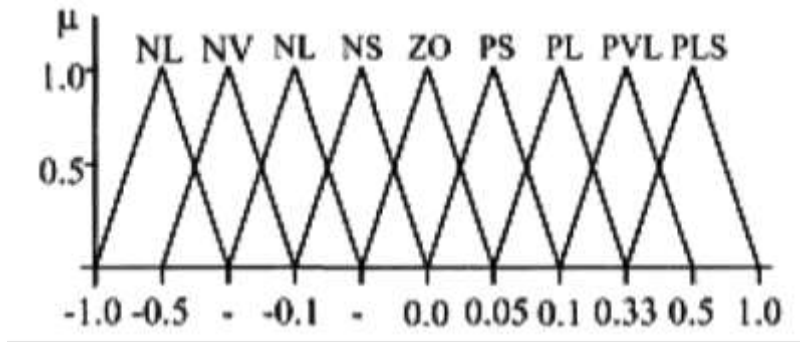


Рис. 3. Функции принадлежности для  $p_i(t)$

Терм-множество выходной лингвистической переменной - оценки вероятности потери пакетов DPV можно определить, как:

$$DPV = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1\}. \quad (4)$$

Значение цены для периодической выборки текущего времени вычисляется по формуле [3]:

$$p(t+1) = [p(t) + \gamma(a_i(b_i(t) - b_i^*) + x_i(t) - c_t(t))]^+ \quad (5)$$

Аналогично для предыдущей выборки:

$$p(t) = [p(t-1) + \gamma(a_i(b_i(t-1) - b_i^*) + x_i(t-1) - c_t(t-1))]^+, \quad (6)$$

где  $\gamma > 0$  и  $a_i > 0$  являются маленькими константами, и  $[z]^+ = \max\{z, 0\}$ .  $b_i(t)$  - совокупное занятие буфера при длине очереди  $l$ ,  $t$  - период,  $b_i^*$  - целевая (желательная) длина очереди,  $x_i(t)$  - совокупная входная норма (скорость),  $c_t(t)$  - доступная полоса пропускания,  $x_i(t) - c_t(t)$  - норма (скорость) несоответствия,  $b_i(t) - b_i^*$  - отклонение очереди от желаемого значения.

База правил содержит ряд правил IF-THEN, которые являются основой для решения задачи в блоке логического решения. Этот ряд правил зависит от разработчика и может быть видоизменен для обеспечения лучших характеристик. Например,

$$\text{IF}(p(t+1) = \text{NLS}) \text{ AND } p(t) = \text{PL}) \text{ THEN } DPV = 0.4, \quad (7)$$

где DPV генерируется нечетким регулятором благодаря комбинации входов. В табл. 1 представлены все возможные выходные значения, которые генерирует FLEM-регулятор.

#### Нечеткие правила

Таблица 1

DPV	NLS	NVL	NL	NS	ZO	PS	PL	PVL	PLS
NLS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.5	0.6
NVL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.5	0.6	0.7
NL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.6	0.7	1.0
NS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0
ZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0
PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.7	1.0	1.0
PL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.7	1.0	1.0
PVL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	0.7	1.0	1.0
PLS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	1.0	1.0	1.0

В блоке формирования логического решения происходят следующие процессы. Определяются множества правил, которые лучше подходят. Этот процесс зависит от выбора функций принадлежности и числа входов FLC.

Далее механизм формирования логического решения определяет значение оценки вероятности отбрасывания пакетов DPV.

В блоке дефаззификации, который находится в выходном каскаде нечеткого FREM-регулятора, вычисляется оценка вероятности отбрасывания пакетов, по выражению (1).

Рассмотрим результаты моделирования сети с помощью FREM-регулятора [1-2]. Топология моделируемой сети показана на рис. 4.

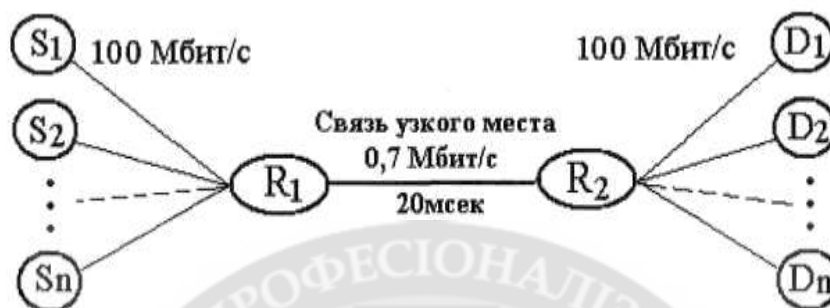


Рис. 4. Топология модулируемой сети

Топология модулируемой сети состоит из двух маршрутизаторов, R1 и R2,  $n$  источников сообщения  $S_i$  и  $n$  приемников  $D_i$ . Все линии связи между маршрутизаторами и источниками/приемниками сообщений имеют скорость 100 Мб/с. Задержка распространения произведена беспорядочно. Между маршрутизаторами R1 и R2 существует так называемое "узкое место" - канал связи со скоростью 0.7 Мб/с и задержкой 20 миллисекунд. Все источники и приемники используют PQM-метод типа Drop Tail с достаточной буферной емкостью. Буфер между маршрутизаторами имеет емкость 200 пакетов и использует такие AQM-методы как: FREM, REM, PID. Желательная длина очереди установлена в 80 пакетов. Средний размер пакета 512 байтов. Время моделирования 100 секунд. В данной сети рассматривается только FTP-потоки. Данное моделирование проводилось в среде моделирования NS2.

Описание характеристики любого AQM-метода может быть представлено двумя способами: переходной характеристикой и устойчивостью. Можно использовать мгновенную длину очереди для оценки переходной характеристики, а ошибку в установившемся режиме (устойчивость) характеризовать среднеквадратичным отклонением  $s_e$ , которое определяется как

$$s_e = \sqrt{\frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M (q_i - q_{ref})^2}, \quad (7)$$

где  $q_{ref}$  - желаемая длина очереди,  $q_i$  -  $i$ -ая выборка длины очереди,  $i = 1, 2, \dots, M$  - итерация,  $M$  - количество интервалов выборки.

Рассмотрим основные параметры сети (длина очереди, потери пакетов, задержка, пропускная способность) для разного количества источников/приемников ( $n = 100, 200, 300$ ). На рис. 5-7 показано значение длины очереди при использовании FREM-, REM- и PID-методов активного управления очередью для 100 соединений.

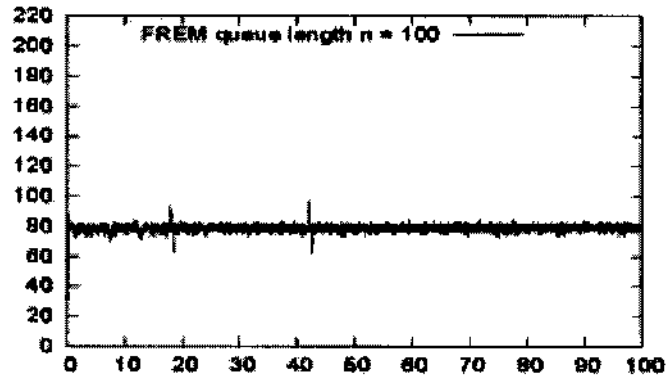


Рис. 5. Длина очереди для 100 источников (FREM)

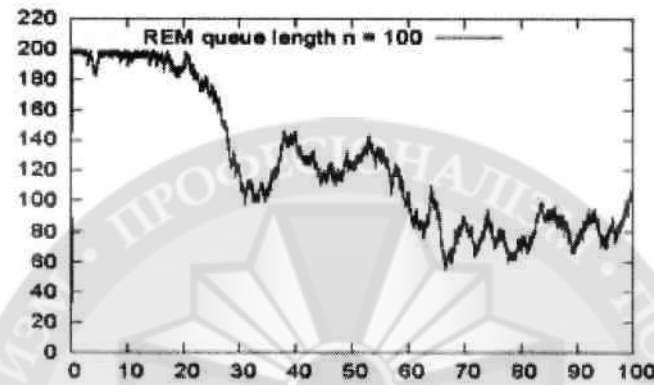


Рис. 6. Длина очереди для 100 источников (REM)

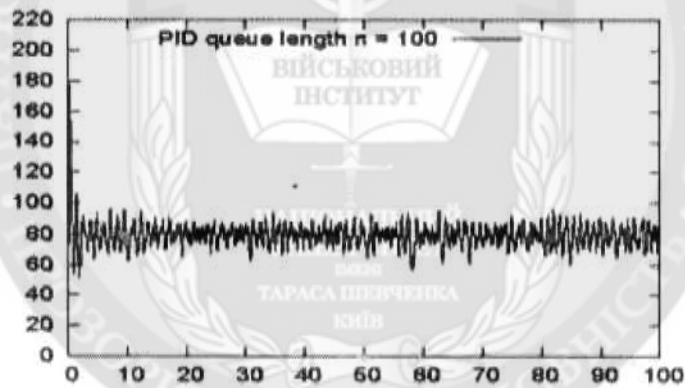


Рис. 7. Длина очереди для 100 источников (PID)

Значение длины очереди FREM-, REM- и PID-методов при 300 источниках/приемниках сообщений показано на рис.8-10.

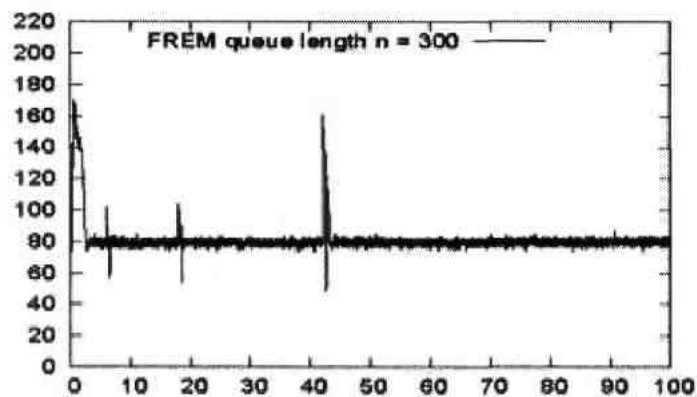


Рис. 8. Длина очереди для 300 источников (FREM)

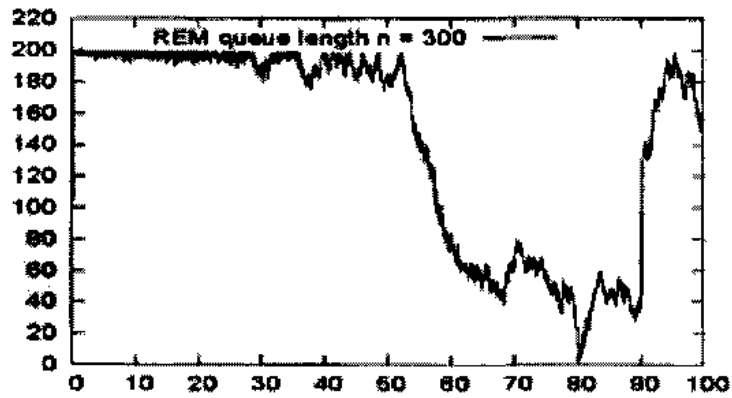


Рис. 9 Длина очереди для 300 источников (REM)

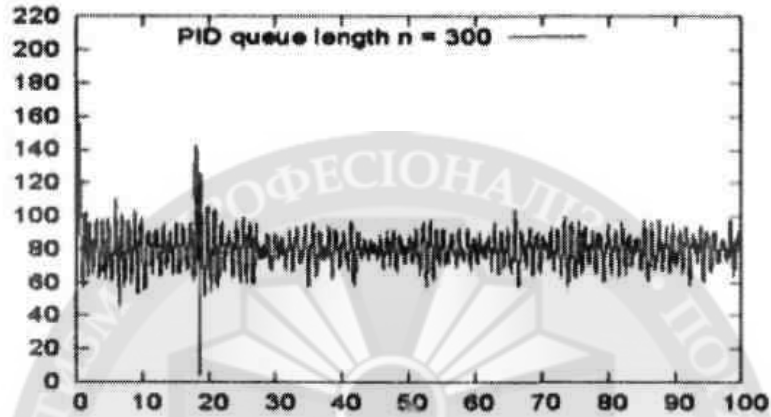


Рис. 10. Длина очереди для 300 источников (PID)

Проанализировав приведенные данные, можно увидеть, что REM-метод не может удерживать длину очереди около заданного значения  $q_{ref} = 80$  пакетов, а PID-метод, в свою очередь, имеет нестабильную характеристику. Вместе с тем, FREM-метод имеет стабильные и устойчивые значения длины очереди при разной нагрузке.

В табл. 2 показаны значения среднеквадратичного отклонения  $s_e$  для трех заданных AQM-алгоритмов.

Значение среднеквадратичного отклонения  $s_e$  для AQM-алгоритмов (пакеты)

Таблица 2

Количество источников, $n$	FREM	PID	REM
100	3,45	8,42	62,80
200	7,21	10,45	77,75
300	10,90	11,45	90,38

Как показано в табл. 2 значение среднего квадратичного отклонения  $s_e$  при использовании FREM- и PID-методов на порядок ниже, чем при использовании REM-алгоритма для разного числа источников (приемников) сообщения ( $n = 100, 200, 300$ ).

В табл. 3 приведены значения задержки пакетов для заданных AQM-алгоритмов.

Значение средней задержки пакетов AQM-алгоритмов (м. сек)

Таблица 3

Количество источников, $n$	<b>FREM</b>	<b>PID</b>	<b>REM</b>
100	300,58	302,70	445,99
200	288,14	300,19	488,31
300	305,35	299,49	483,30

При использовании FREM- и PID-алгоритмов, средняя задержка маршрутизатора имеет меньшее значение, чем при использовании REM-алгоритма.

В табл. 4 и 5 показаны значения средних потерь пакетов и средних пропускных способностей.

Нормы средних потерь пакетов AQM-алгоритмов (%)

Таблица 4

Источники	<b>FREM</b>	<b>PID</b>	<b>REM</b>
100	15,77	12,39	9,67
200	23,56	17,30	14,43
300	24,23	19,78	19,26

Нормы средних пропускных способностей AQM-алгоритмов (кбит/сек)

Таблица 5

Источники	<b>FREM</b>	<b>PID</b>	<b>REM</b>
100	3,74	3,75	3,75
200	1,96	1,87	1,87
300	1,25	1,25	1,27

**Вывод.** В данной статье показан один из вариантов технического решения активного управления очередью в сетях TCP/IP. Полученные данные в результате моделирования, дают возможность утверждать, что FREM-алгоритм имеет значительно меньшие среднеквадратичные отклонения от желаемой длины очереди  $s_e$  и средние задержки пакетов, но наибольшие значения потерь пакетов среди других заданных AQM-алгоритмов. Так же средняя задержка маршрутизатора имеет меньшее значение, чем при использовании REM-алгоритма. Как преимущество REM-алгоритма следует отметить возможность получения максимального использования канала связи, низкие потери пакетов и малую задержку очереди буфера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гостев В.И., Скуратов С.Н. Автоматическая система управления активной очередью в сетях TCP / IP: Монография. - Нежин: Нежинский государственный университет Николай Гоголь, 2013. - 528 с.

2. Гостев В.И. Новый метод проектирования нечетких контроллеров для систем автоматического управления. - Палмариум академических изданий, (Германия). - 2013. - 217 с.



3. Гостев В.И. Проектирование нечеткой системы управления для систем автоматического управления: Монография. - ООО «Нежин» Издательский дом «Аспект-Полиграф» - 2009. - 416 с.
4. Гостев В.И., Скуратов С.Н. Fazi активного управления очередью в сетях TCP / IP: Монография. - ООО «Нежин» Издательский дом «Аспект-Полиграф» - 2011. - 464 с.

#### REFERENCES:

1. Gostev V.I, Scuratov S.N. Automatic system of active queue management in networks TCP/IP: *Monograph*. - Nizhyn: Nezhinskii State University Nikolai Gogol, 2013. - 528 p.
2. Gostev V.I. New design method of fuzzy controllers for automatic control systems. - Palmarium academic publishing, (Germany). - 2013. - 217 p.
3. Gostev V.I. Design of Fuzzy Control System for automatic control systems: *Monograph*. - Nizhin LLC Publishing house "Aspect-Poligraf" - 2009. - 416 p.
4. Gostev V.I, Scuratov S.N. Fazi of active queue management in networks TCP/IP: *Monograph*. - Nizhin LLC Publishing house "Aspect-Poligraf" - 2011. - 464 p.

Без рецензії.

к.т.н., с.н.с. Гостєв В.В., к.т.н., доц. Савков П.А., к.т.н., доц. Пампуха І.В., Пусан В.В.  
**АРХІТЕКТУРА НЕЧІТКОГО FREM-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НОРМ  
НЕВІДПОВІДНОСТІ**

*У статті розглядається архітектура нечіткого FREM-регулятора, який виявляє норму невідповідності, порівнюючи миттєву довжину черги з її попередньої обраної (дискретної) величиною і має трикутні функції приналежності заданої форми. Докладно описані і задані нечіткі правила, топологія модельованої мережі. Представлена архітектура, а також правила функціонування регулятора. Наведено функції належності для регулятора. Завдання топології моделювання мережі дозволяє отримати експериментальні осцилограми довжин черг для 100 і 300 джерел. Розраховані значення середньоквадратичного відхилення і наведені значення затримок різної кількості джерел для FREM-, PID-, REM-регуляторів. При цьому FREM-алгоритм має значно менші середньоквадратичні відхилення від бажаної довжини черги  $s_e$  і середні затримки пакетів. Описана можливість використання миттєвої довжини черги для оцінки перехідної характеристики, значення втрат пакетів серед інших заданих AQM-алгоритмів.*

*Ключові слова: FREM-регулятор, архітектура, база правил, функції приналежності, перехідної характеристики, середньоквадратичним відхиленням.*

Ph.D. Hostiev V.V., Ph.D. Savkov P.A., Ph.D. Pampuha I.V., Pusan V.V.  
**FUZZY FREM-CONTROLLER ARCHITECTURE FOR DETECTING NON-COMPLIANCE  
RATES**

*The article deals with the architecture of the fuzzy FREM-controller, which detects the discrepancy rate by comparing the instantaneous queue length with its previous selected (discrete) value and has triangular membership functions of a given shape. Fuzzy rules, topology of the simulated network have been described in detail and given. The architecture, as well as the regulator functioning rules have been presented. The accessory functions for the controller are given. A given topology of the network simulation makes it possible to obtain experimental oscillograms of the queue lengths for 100 and 300 sources. The values of the mean-square deviation have been calculated and the delay values of different number of sources for FREM-, PID-, REM-regulators have been given. In this case FREM-algorithm has significantly smaller mean-square deviations from the desired queue length  $s_e$  and average packet delays. The possibility of using the instantaneous queue length for estimating the transition characteristic, the value of packet loss among other specified AQM algorithms have been described.*

*Keywords: FREM-controller, architecture, rules base, membership functions, transient characteristics, rmean-square deviation.*