

Гостев В.И.,  
Скуртов С.Н.,  
Невдачина О.В.,  
Кротов В.Д.

## НЕЧЕТКОЕ АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОЧЕРЕДЬЮ В УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ РАДИОСВЯЗИ

*Исследованы процессы в мобильной узкоспециализированной сети Ad-Hoc с разработанным нечетким регулятором на основе интерактивной системы MATLAB. Сеть представлена замкнутой системой автоматического управления (системой с активным управлением очередью – AQM-системой) с переменными параметрами (переменным числом коммуникационных каналов или числом сессий TCP  $N(t)$  и временем прохождения пакетов туда и обратно  $R(t)$ ).*

**Ключевые слова:** сети Ad-Hoc, MATLAB, AQM-система, число сессий TCP.

*Досліджено процеси в мобільній вузькоспеціалізованій мережі Ad-Hoc із розробленим нечітким регулятором на основі інтерактивної системи MATLAB. Мережа представлена замкненою системою автоматичного керування (системою з активним керуванням чергою – AQM-системою) зі змінними параметрами (змінним числом комунікаційних каналів чи числом сесій TCP та часом проходження пакетів туди й назад).*

**Ключові слова:** мережі Ad-Hoc, MATLAB, AQM-система, число сесій TCP.

*Processes in mobile highly specialized network Ad-Hoc with the developed fuzzy controller on the basis of interactive system MATLAB are investigated. The network is presented by the closed loop system of automatic control (system with active queue management - AQM-system) with variable parameters (variable number of communication channels or number of sessions TCP and variable round tri time).*

**Keywords:** network Ad-Hoc, MATLAB, AQM-system, number of sessions TCP.

Мобильная узкоспециализированная сеть (**mobile Ad-Hoc network**) является сетью без инфраструктуры, где каждый узел может работать как маршрутизатор. В технической литературе сети **Ad-Hoc** описываются как беспроводные самоорганизующиеся, динамические, децентрализованные сети, не имеющие постоянной структуры [1–9]. У каждого узла есть протоколы и службы, чтобы запросить и предоставить услуги другим узлам с возможностью обработки перегрузки. Традиционно обработка перегрузки осуществляется через протокол **TCP**, который передает сигнал перегрузки, отбрасывая входящие пакеты, когда очередь узла переполнена и маршрутизатор перегружен (политика отбрасывания хвоста **Tail Drop-TD**). В

отличие от традиционного управления очередью, которое начинает отбрасывать входящие пакеты только тогда, когда очередь уже переполнена, при активном управлении очередью (**Active Queue Management-AQM**) отбрасывание входящих пакетов осуществляется прежде, чем очередь будет полна.

Целью протокола **TCP** является установка сквозного соединения, сквозной доставки пакетов данных, управление потоком и управления перегрузкой. **TCP** использует механизм управления потоком, основанный на применении окон. Отправитель поддерживает переменный размер окна, который лимитирует число возможных отправленных пакетов. Адресат отправляет подтверждение (**ACK**) для пакетов, которые получил. Принцип окна пакетной передачи переменной длительности основывается на том, что когда исчерпывается размер окна, отправитель ожидает **ACK** прежде, чем отправить новый пакет. Это время ожидания известно как период простоя (тайм-аут) для повторной передачи (**Retransmission TimeOut-RTO**). Если не приходит **ACK** в течении этого периода **RTO**, то отправитель предполагает, что пакет потерян. Потеря пакета происходит из-за перегрузки в сети, которая требует **TCP** запускать механизм управления перегрузкой.

Мобильные узкоспециализированные сети испытывают динамические изменения в топологии сети из-за произвольной мобильности узлов. Изменения топологии приводят к частым изменениям подключения линий радиосвязи, и, следовательно, маршруты восстановления могут повторяться очень часто. Этот процесс восстановления маршрута занимает значительное время. Время восстановления маршрута является функцией дальности передачи узлов, расстоянием между источником и адресатом, числом промежуточных узлов между источником и адресатом и узловой скоростью. Если время восстановления маршрута превышает период **RTO** узла источника, источник не получает **ACK** и предполагает перегрузку в сети, сопровождаемую повторной передачей потерянных пакетов и инициированием механизма управления перегрузкой. На рис. 1 схематически показана переполненная узкоспециализированная сеть. Источник отправляет пакеты данных через узел **A**, который передает эти пакеты на узел **B** и тот отправляет дальше получателю. Как только канал связи между источником и узлом **A** повреждается, запускается процесс восстановления маршрута и создается прямой канал связи с узлом **B**. Если время обработки меньше, чем **RTO**, то источник получит **ACK** и отправит другие пакеты данных, в противном случае снова отправит предыдущие потерянные пакеты.

Мобильные узкоспециализированные сети испытывают высокую сетевую перегрузку из-за высокого коэффициента скорости битовых ошибок (**Bit Error Rate – BER**) в беспроводном канале, повышаются конфликты из-за присутствия скрытых терминалов, интерференции, расположения зависимого соединения, однонаправленных ссылок, повреждений маршрута из-за мобильности узлов и присутствием постепенно изменяющимся свойствам беспроводного канала. Это доказывает потребность в высокоадаптивных алгоритмах **AQM** с адаптирующимися возможностями к высокой изменчивости и неопределенности, свойственных этим типам сетей. Нечеткое **AQM** в состоянии преодолеть вышеупомянутый недостаток узкоспециализированных сетей.

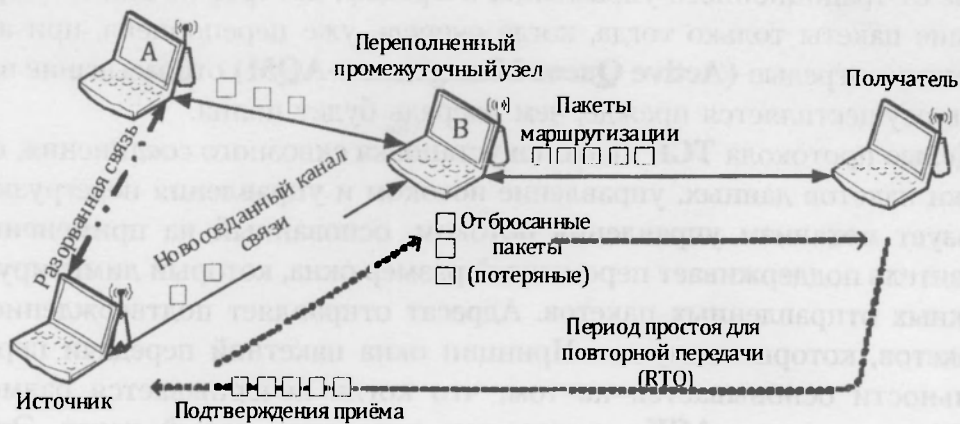


Рис.1. Перегрузка в узкоспециализированных сетях

Когда выявляется перегрузка, узел использует одну из стратегий **AQM**, отбрасывая входящие пакеты данных. Тем временем это позволяет управляющим пакетам проходить в очередь, используя политику отбрасывания хвоста. Вследствие этого, пакеты данных отбрасываются первыми, когда вероятность отбрасывания пакетов превышает определенный порог, в то время как управляющие пакеты являются еще допущенными, пока очередь не полна.

Управляющие сообщения предпочтительно передаются в очередь во время перегрузки по следующим причинам:

- управляющие сообщения используются, чтобы обновить изменения топологии сети. Поэтому они предотвращают передачу пакета данных через поврежденные маршруты;

- пакеты данных являются “ориентируемыми на соединение”, то есть с гарантируемой доставкой до места назначения через **TCP**. И напротив, управляющие сообщения являются “без установления соединения”; то есть, отброшенное сообщение не будет передаваться повторно;

- размер управляющего сообщения является очень маленьким по сравнению с пакетом данных. Обычно в узкоспециализированных протоколах маршрутизации, размер сообщения управления составляет 64 байта, в то время как пакет данных составляет 512 байтов, то есть, управляющее сообщение берет небольшое пространство в очереди и быстрее обрабатывается на узле.

В работе [1] используется нечеткая логическая система для вычисления вероятности отбрасывания в узкоспециализированных сетях на основании текущего размера очереди и числа соседних узлов. Эта схема может быть применима в любой сети, где число соседних узлов представлено как число коммуникационных каналов связи или, точнее, число сессий **TCP**.

Текущий размер очереди  $q_c$  является основным признаком оценки вероятности отбрасывания входящих пакетов в политике **AQM**. Вероятность отбрасывания  $p_d$  вычисляется как:  $p_d = 2N^2 / (CT_p + q_c)^2$ , где  $N$  – коэффициент нагрузки,  $C$  – пропускная способность (пакеты/сек), и  $T_p$  – задержка передачи (секунды). Вероятность отбрасывания пакета повышается с увеличением нагрузки. С увеличением нагрузки возрастает и количество пакетов в очереди, ожидающих обработки. Таким образом, при увеличении очереди вероятность отбрасывания

входящих пакетов также высока и наоборот. Следовательно, можно предположить следующие правила:

Правило 1: Если низкий (небольшой), то  $p_d$  – низкая;

Правило 2: Если средний, то  $p_d$  – средняя;

Правило 3: Если большой, то  $p_d$  – высокая.

В узкоспециализированных сетях трафик распределяется по категориям пакетов данных и управляющих сообщений. Управляющие сообщения используются для непрерывного обновления узлов при изменении топологии (новые создаваемые или потерянные каналы связи). Например, если у узла есть два соседних узла, то каждую секунду он будет получать два приветственных сообщения от них. Кроме этого, он получает запрос маршрута, сообщения о повреждении маршрута или пакеты данных. А если у узла десять соседних узлов, то он получает каждую секунду по десять приветственных сообщений вместе с огромным количеством управляющих сообщений и пакетов данных. Следовательно, трафик меньше проходит через узлы с меньшим окружением, чем через узлы с большим окружением. Нагрузка  $N$  может быть записана как:  $N = \sum_{i=0}^n \lambda_i$ , где  $\lambda_i$  – скорость потока от соседнего узла  $i$ , и  $n$  – число соседей. Отсюда перегрузка:  $p_d = 1$  если  $N = \sum_{i=0}^n \lambda_i > C$  и  $q_c = q_m$ , где  $q_m$  – максимальный размер очереди.

Следовательно, при высокой концентрации соседей узла, очередь узла будет быстро наполняться, что ведет к увеличению вероятности перегрузки и наоборот.

В данной работе исследованы процессы в мобильной узкоспециализированной сети **Ad-Hoc** с разработанным нечетким регулятором на основе интерактивной системы **MATLAB**. Сеть представлена замкнутой системой автоматического управления (системой с активным управлением очередью – **AQM**-системой) с переменными параметрами (переменным числом коммуникационных каналов или числом сессий **TCP** и временем прохождения пакетов туда и обратно  $R(t)$ ).

*Решение задачи.* Поскольку число соседних узлов (плотность (концентрация) соседей) представлено как число коммуникационных каналов связи или, точнее, число сессий **TCP**, то можно использовать общую схему **AQM** системы, скорректированной нечетким регулятором, показанную на рис. 2, где  $N(t)$  – число сессий, и принять, что на нечеткий регулятор в какой-то момент времени поступают с шагом квантования следующие входные переменные: ошибка  $e = Error$  между заданной длиной очереди и реальной длиной очереди ( $t = \delta q = q_0 - q$ ), и скорость изменения этой ошибки (в практической схеме нечеткого регулятора вместо скорости используется первая разность от переменной “ошибка” –  $\Delta e$ ).

Функции принадлежности двух входных лингвистических переменных (ошибки  $e = Error$  между заданной длиной очереди и реальной длиной очереди и скорости изменения этой ошибки  $\Delta e$ ) и выходной лингвистической переменной (вероятности отбрасывания пакетов) примем идентичными и такими, какие приведены на рис. 3.

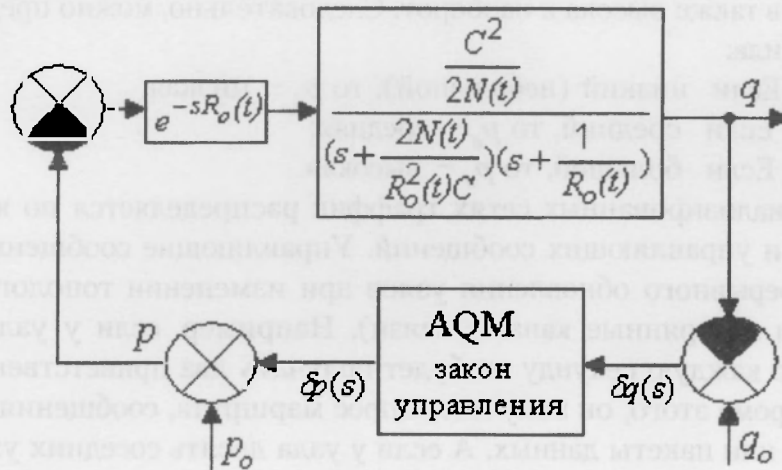


Рис.2. Общая схема AQM системы, скорректированной AQM-регулятором

Функции принадлежности (ФП) для каждой лингвистической величины определяются по формулам (см. рис. 3):

$$\mu_1(u) := \begin{cases} \frac{1-a-u}{1-a}, & 0 \leq u \leq 1-a; \\ 0, & 1-a < u < 1; \end{cases} \quad \mu_2(u) = \begin{cases} 0, & 0 \leq u \leq a; \\ \frac{u-a}{1-a}, & a < u \leq 1; \end{cases}$$

$$\mu_3(u) = \begin{cases} \frac{2(u-a)}{1-2a}, & a < u < 1/2; \\ \frac{2(1-a-u)}{1-2a}, & 1/2 \leq u < 1-a; \\ 0, & 0 < u < a \text{ и } 1-a < u < 1. \end{cases} \quad (1)$$

При этом функция  $\mu_1(u)$  определяет терм *низкая*, функция  $\mu_2(u)$  определяет терм *высокая*, а функция  $\mu_3(u)$  определяет терм *средняя*.

Осуществляется пересчет входных переменных в переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$  на универсальном множестве  $U = [0,1]$ , а затем расчет значений ФП для этих переменных (см. рис. 3). Точками на универсальном множестве отмечены возможные для какого-то момента времени значения переменных  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ .

Какие бы значения не принимали переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ , на универсальном множестве  $U = [0,1]$ , в зависимости от соотношений величин А, В и С, “результующая фигура” может принимать только три конфигурации: при  $A < C < B$  первая конфигурация показана на рис. 3а; при  $A > C > B$  вторая конфигурация показана на рис. 3б; при  $\begin{cases} A < B < C \\ B \leq A < C \end{cases}$  третья конфигурация показана на рис. 3в.

Абсцисса “центра тяжести результирующей фигуры” при  $A < C < B$  определяется по формуле [10]

$$u_c = \frac{\frac{B}{2} + \frac{a^2}{2}(A-B) + (\frac{a}{4} - \frac{a^2}{2})A^2 - (\frac{a}{2} - \frac{a^2}{2})B^2 + \frac{a}{4}C^2 + \frac{1}{6}[(\frac{1}{2}-a)^2 A^3 - (1-a)^2 B^3 + (\frac{3}{4}-a)C^3]}{B + a(A-B) + (\frac{1}{4} - \frac{a}{2})A^2 + (\frac{a}{2} - \frac{1}{2})B^2 + \frac{1}{4}C^2} \quad (2)$$

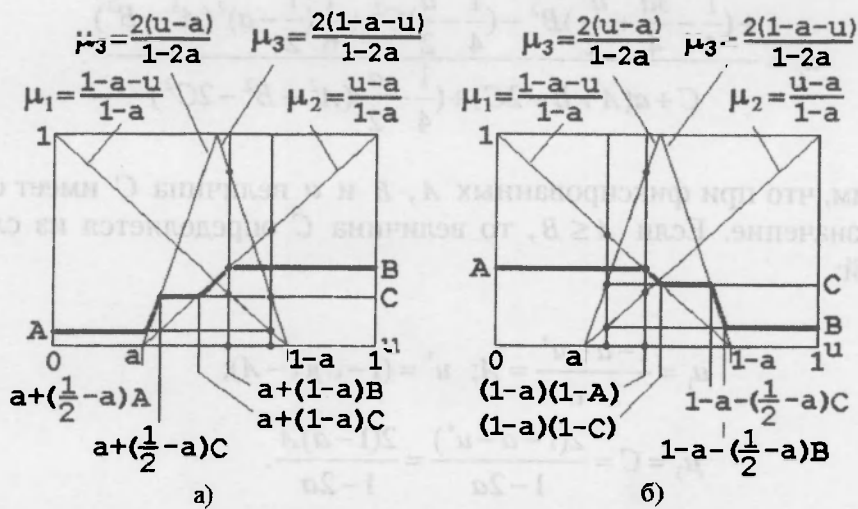


Рис. 3. Функции принадлежности для входных и выходной переменных

Абсцисса "центра тяжести результирующей фигуры" при  $A \geq C \geq B$  определяется по формуле [10]

$$u_c = \frac{\frac{A}{2} + (a - \frac{a^2}{2})(B-A) - \frac{1}{2}(1-a)^2 A^2 + (\frac{1}{4} - \frac{3a}{4} + \frac{a^2}{2})B^2 + \frac{1}{4}(1-a)C^2 + \frac{1}{6}[(1-a)^2 A^3 - (\frac{1}{2}-a)^2 B^3 - (\frac{3}{4}-a)C^3]}{A + a(B-A) + (\frac{1}{4} - \frac{a}{2})B^2 + (\frac{a}{2} - \frac{1}{2})A^2 + \frac{1}{4}C^2} \quad (3)$$

Абсцисса “центра тяжести результирующей фигуры” при  $\begin{cases} A < B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$  определяется по формуле [10]

$$u_c = \frac{\frac{a^2}{2}A + (a - \frac{a^2}{2})B + (\frac{1}{2} - a)C + (\frac{a}{4} - \frac{a^2}{2})A^2 + (\frac{1}{4} - \frac{3a}{4} + \frac{a^2}{2})B^2 - (\frac{1}{4} - \frac{a}{2})C^2 + \frac{1}{6}(\frac{1}{2} - a)^2(A^3 - B^3)}{C + a(A + B - 2C) + (\frac{1}{4} - \frac{a}{2})(A^2 + B^2 - 2C^2)} \quad (4)$$

Отметим, что при фиксированных  $A$ ,  $B$  и  $a$  величина  $C$  имеет строго определенное значение. Если  $A \leq B$ , то величина  $C$  определяется из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{1 - a - u^*}{1 - a} = A; \quad u^* = (1 - a)(1 - A); \\ \mu_2 &= C = \frac{2(1 - a - u^*)}{1 - 2a} = \frac{2(1 - a)A}{1 - 2a}. \end{aligned} \quad (5)$$

Если  $A > B$ , то величина  $C$  определяется из следующих соотношений:

$$\mu_2 = \frac{u^* - a}{1 - a} = B; \quad u^* = a + (1 - a)B; \quad \mu_3 = C = \frac{2(u^* - a)}{1 - 2a} = \frac{2(1 - a)B}{1 - 2a}. \quad (6)$$

В качестве примера приведем следующие результаты расчетов (контрольные точки).

При  $A=0,1$ ,  $B=0,4$ ,  $C=0,3$ ,  $a=0,25 \Rightarrow u_c = 0,6158$ .

При  $A=0,4$ ,  $B=0,1$ ,  $C=0,3$ ,  $a=0,25 \Rightarrow u_c = 0,3842$ .

При  $A=0,1$ ,  $B=0,2$ ,  $C=0,3$ ,  $a=0,25 \Rightarrow u_c = 0,5491$ .

При  $A=0,2$ ,  $B=0,1$ ,  $C=0,3$ ,  $a=0,25 \Rightarrow u_c = 0,4509$ .

Рассмотрим нечеткий регулятор, выполненный по структурной схеме, которую представим в виде последовательного соединения трех блоков (см. рис. 4а) [10]: **формирователя величин  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$**  (блок 1), **блока сравнения величина  $A$ ,  $B$  и  $C$  и расчета  $u_c$**  (блок 2) и **блока нормировки выходной переменной** (блок 3) [1]. На вход регулятора поступает ошибка системы  $\theta = \text{Error}$ , а скорость изменения (первая производная) ошибки  $\dot{\theta}$  вычисляется в формирователе по формуле

$$\dot{\theta}(t) \approx \{ \theta(kh) - \theta[(k-1)h] \} / h, \quad (7)$$

где  $h$  – шаг квантования (шаг поступления информации на вход регулятора). Кроме основных блоков, 1–3 регулятор имеет интегрирующее звено (**Integra-**

tor), которое включено с целью обеспечения в замкнутой системе более высокой точности в установившемся динамическом режиме отработки входного сигнала (т.е. обеспечения меньшей динамической ошибки при поступлении заданной длины очереди  $q_0$ ), и пропорциональное звено (**Gain**) с малым коэффициентом передачи  $\text{alf} \approx 0$ . **Формирователь величин A, B и C** (блок 1 на рис. 4, а) с треугольными функциями принадлежности выполнен по схеме, приведенной на рис. 4, б.

В схеме **формирователя величин A(t), B(t) и C(t)** при настройке нечеткого регулятора перестраиваются граничные значения симметричных диапазонов

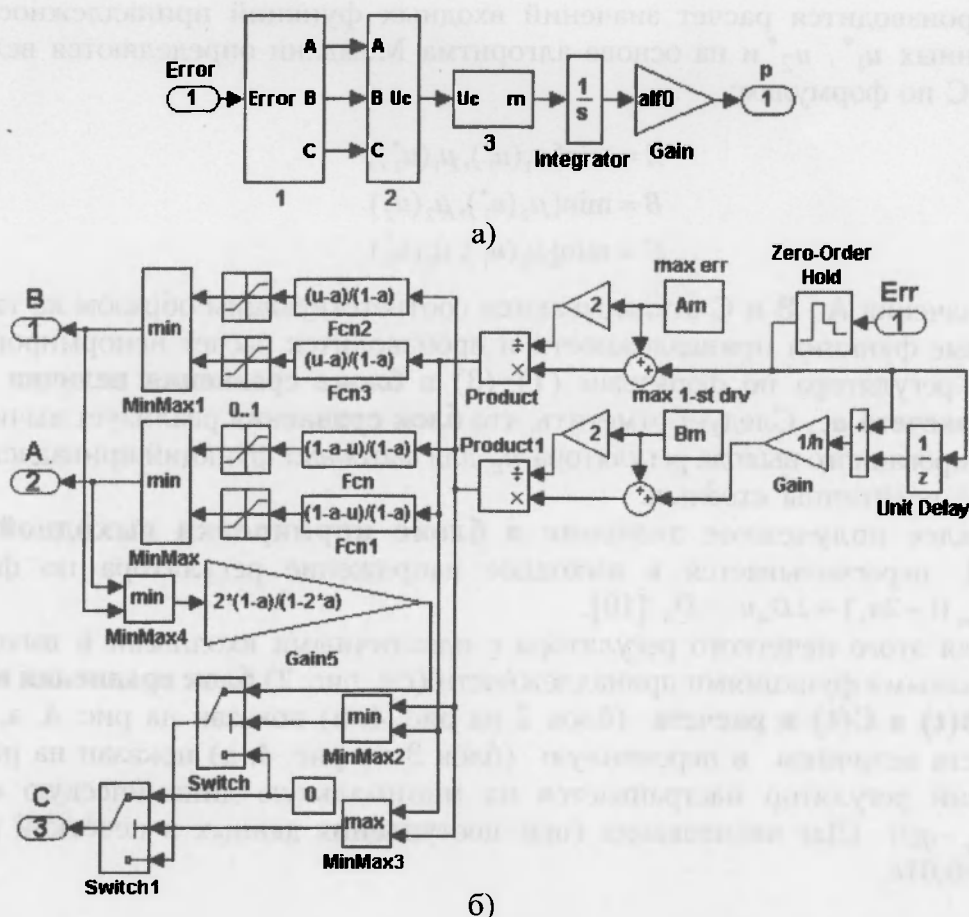
$$A_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min}, \quad B_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min} \quad (8)$$

В блоке **нормировки выходной переменной** перестраиваются граничные значения диапазона  $D_m = m_{\max} = -m_{\min}$ . Коэффициент  $a$  обычно задается постоянным.

В **формирователе величин A(t) и B(t)** ошибка системы (**Error**)  $\theta^*$  квантуется АЦП (Zero-Order Hold), вычисляются первая (**1-st drv**)  $\theta^*$  разность от ошибки с шагом квантования  $h$ , и значения входных переменных  $\theta^*$ ,  $\theta^*$  пересчитываются в переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$  по формулам

$$u_1^* = (\theta^* + A_m) / (2A_m);$$

$$u_2^* = (\theta^* + B_m) / (2B_m) \quad (9)$$





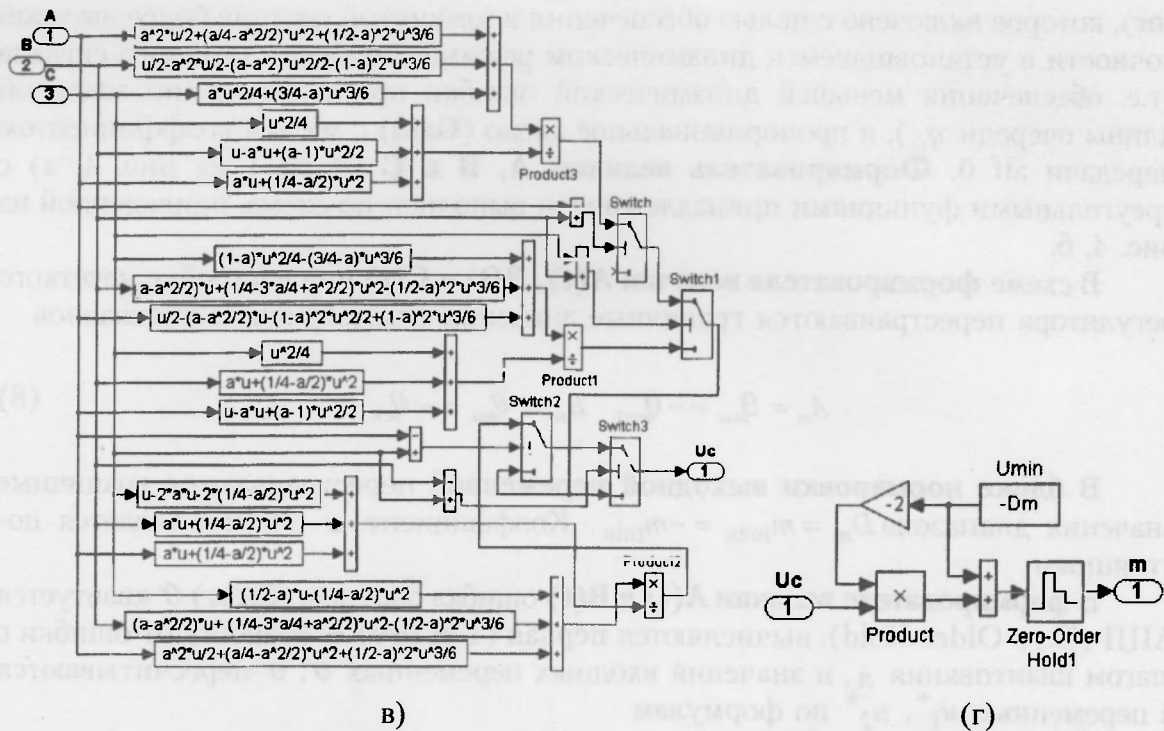


Рис. 4. Принципиальная схема нечеткого регулятора (структурная схема регулятора (а), формирователь величин А, В и С (б), блок сравнения величин А(т), В(т) и С(т) и расчета  $u_c$  (в) и блок пересчета величины  $u_c$  в переменную  $m$  (г))

Производится расчет значений входных функций принадлежности для переменных  $u_1^*$ ,  $u_2^*$  и на основе алгоритма Мамдани определяются величины А, В и С по формулам:

$$\begin{aligned}
 A &= \min[\mu_1(u_1^*), \mu_1(u_2^*)] \\
 B &= \min[\mu_2(u_1^*), \mu_2(u_2^*)] \\
 C &= \min[\mu_3(u_1^*), \mu_3(u_2^*)]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Значения А, В и С откладываются соответствующим образом на такие же выходные функции принадлежности и производится расчет ненормированного выхода регулятора по формулам (1)–(3) в **блоке сравнения величин А(т) и В(т) и расчета  $u_c$** . Следует отметить, что **блок сравнения** реализует вычисление ненормированного выхода регулятора  $u_c$  для *выходных* функций принадлежности, которые идентичны *входным*.

Далее полученное значение в **блоке нормировки выходной переменной** пересчитывается в выходное напряжение регулятора по формуле  $m^* = m_{\min}(1 - 2u_n) = 2D_m u_c - D_m$  [10].

Для этого нечеткого регулятора с идентичными входными и выходными треугольными функциями принадлежности (см. рис. 2) **блок сравнения величин А(т), В(т) и С(т) и расчета** (блок 2 на рис. 4, а) показан на рис. 4, в, а блок пересчета величины в переменную (блок 3 на рис. 4, а) показан на рис. 4, г. Нечеткий регулятор настраивается на минимальную динамическую ошибку  $\theta(t) = q_o - q(t)$ . Шаг квантования (шаг поступления данных в нечеткий регулятор)  $h=0,01c$ .

**Блок сравнения величин  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$  и расчета  $u_c$**  (блок 2 на рис. 4, а) работает следующим образом. На выходе делителя **Product** в схеме (см. рис. 3.70) формируется величина  $u_c$  на основании формулы (1) при  $A \geq C \geq B$ . На выходе делителя **Product1** формируется величина  $u_c$  на основании формулы (2) при  $A < C < B$ . На выходе делителя **Product2** формируется величина  $u_c$  на основании формулы (3) при  $\begin{cases} A < B < C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$ .

Переключатели **Switch** и **Switch1** замыкают верхние контакты при условии  $A < C < B$ , когда на средних контактах этих переключателей сигналы положительные (в блоках **Switch** и **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  $\begin{cases} A < B < C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$ , когда на средних контактах этих переключателей сигналы положительные (в блоках **Switch2** и **Switch3** параметр **Threshold**=0.000001).

При условии  $A < C < B$ , когда на среднем контакте переключателя **Switch2** сигнал положительный, а на среднем контакте переключателя **Switch3** сигнал отрицательный, то в переключателе **Switch2** замкнут верхний контакт, а в переключателе **Switch3** замкнут нижний контакт.

При условии  $A \geq C \geq B$ , когда на среднем контакте переключателя **Switch3** сигнал положительный, а на среднем контакте переключателя **Switch2** сигнал отрицательный, то в переключателе **Switch3** замкнут верхний контакт, а в переключателе **Switch2** замкнут нижний контакт.

Таким образом, при условии  $A < C < B$  сигнал на выход схемы поступает с выхода делителя **Product**, при условии  $A \geq C \geq B$  сигнал на выход схемы поступает с выхода делителя **Product1** и при условии  $\begin{cases} A < B < C \\ B < A < C \end{cases}$  сигнал на выход схемы поступает с выхода делителя **Product2**.

В интерактивной системе **MATLAB** можно представить модель объекта управления соединением звеньев с изменяющимися случайным образом параметрами  $N(t)$  и  $R_o(t)$  и принципиальную схему **AQM** системы, скорректированной **AQM**-регулятором, на основании структурной схемы (см. рис. 2) изобразить в виде рис. 5.

Добавление нескольких дополнительных измерительных элементов в принципиальную схему, приведенную на рис. 5, дает возможность получить размер окна  $W(t)$  (в пакетах), а также эффективную скорость передачи данных  $V(t) = W(t)/R(t)$  (пакеты/сек), величины, по которой конечный потребитель оценивает качество канала связи с другими сетями.

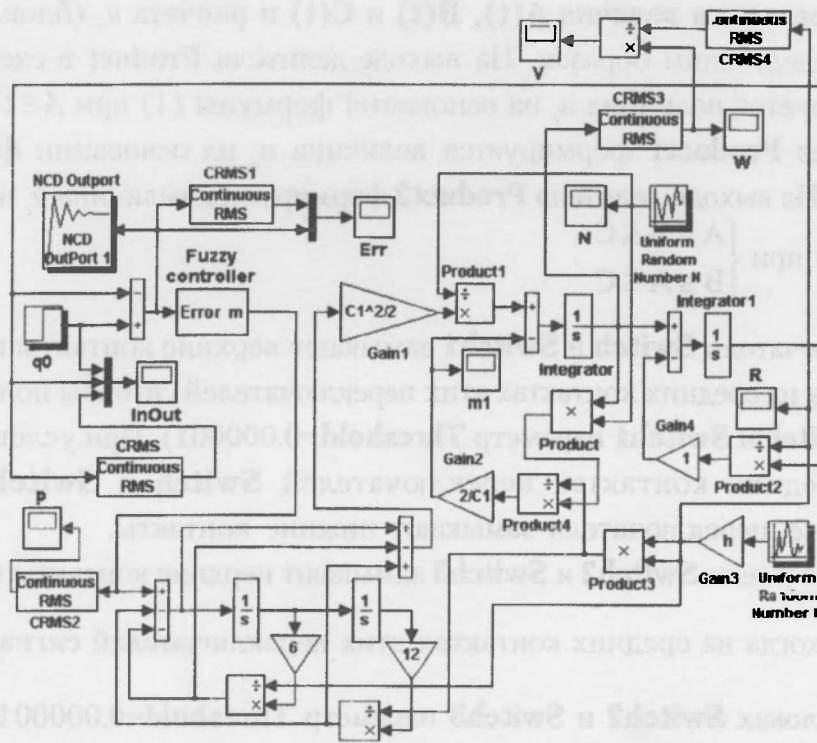


Рис. 5. Модель АҚМ системи, скорректированной нечетким регулятором (FC-регулятором), с дополнительными измерительными элементами

Усилительное звено  $C^2/2/N(t)$  моделируется блоками усилителем **Gain1** и делителем **Product1**, на верхний (на рис. 5) вход которого поступает сигнал  $N(t)$ . Апериодическое звено  $[s + 2N(t)/R_0^2(t)/C]$  моделируется интегратором **Integrator**, охваченным отрицательной обратной связью, которая включает умножитель **Product**, на нижний (на рис. 5) вход которого поступает сигнал  $N(t)$ , делитель **Product4**, на верхний (на рис. 5) вход которого поступает сигнал  $R_0^2(t)$  и усилитель **Gain2** с коэффициентом  $2/C$ .

Апериодическое звено  $[s + 1/R_0(t)]$  моделируется интегратором **Integrator1**, охваченным отрицательной обратной связью, которая включает делитель **Product2**, на верхний (на рис. 5) вход которого поступает сигнал  $R_0(t)$  и усилитель **Gain4** с коэффициентом, равным единице.

Звено чистого запаздывания при аппроксимации функцией Паде второго порядка (см. формулу (5)) моделируется при помощи двух интеграторов, двух усилителей с коэффициентами 6 и 12 и двух делителей на верхние (на рис. 5.2) входы которых поступают сигналы  $R_0(t)$  и  $R_0^2(t)$ .

$$e^{-sR_0(t)} \approx \frac{s^2 - \frac{6}{R_0(t)}s + \frac{12}{R_0^2(t)}}{s^2 + \frac{6}{R_0(t)}s + \frac{12}{R_0^2(t)}} \quad (11)$$

Отметим, что при настройке нечеткого регулятора в интерактивной системе **MATLAB** можно использовать блок **NCD (Nonlinear Control Design)**, который реализует метод динамической оптимизации для проектирования систем управления. Этот инструмент, разработанный для использования с **Simulink**,

автоматически настраивает системные параметры (в системе на рис. 5 настраиваются параметры регулятора), основываясь на определенных ограничениях на временные характеристики (например, время регулирования и перерегулирование для реакции на ступенчатое воздействие) или пределы для динамической ошибки рассогласования.

Предположим, что время следования туда и обратно  $R_o(t)$  изменяется случайным образом в пределах от 220 мсек до 300 мсек, а нагрузка трафика  $N(t)$  изменяется также случайным образом в пределах от 5 до 25. Такие “возмущающие воздействия” на систему (см. рис. 5) могут генерировать в интерактивной системе **MATLAB** блоки **Uniform Random Number**. Отметим, что в реальных сетях и время следования туда и обратно, и нагрузка трафика может изменяться случайным образом в различных пределах, но для сравнения работы регулятора выбраны “возмущающие воздействия”, показанные на рис. 6, а и б.

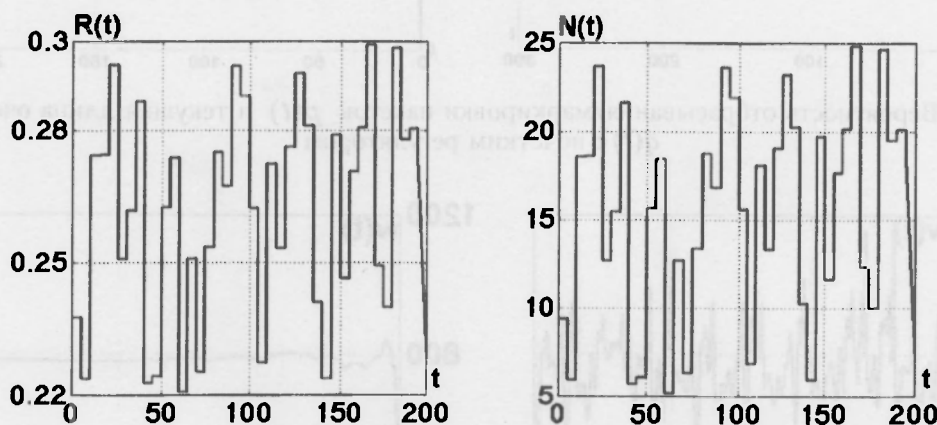


Рис. 6. Время следования туда и обратно  $R_o(t)$  (а) и нагрузка трафика  $N(t)$  (б)

Емкость связи (пропускную способность сети) выберем равной  $C=3750$  пакетов/сек, желаемую длину очереди примем равной  $q_o=200$  пакетов.

Процессы в **AQM** системе, скорректированной нечетким регулятором, получены при следующих параметрах регулятора:  $h=0.01c$ ;  $alf0=10^{(-5)}$ ;  $Am=1100$ ;  $Bm=980$ ;  $Dm=2200$ ;  $a=0.25$ .

На рис.7 приведены выходная переменная **FC**-регулятора  $p(t)$  – вероятность отбрасывания/маркировки пакетов с выхода блока **CRMS2** (а) и выход системы  $q(t)$  – текущая длина очереди (б) при указанных параметрах регулятора. Изменения размера окна **TCP**  $W(t)$  показаны на рис. 8: на рисунке (а) функция  $W(t)$  снята непосредственно, а на рисунке (б) – на выходе блока **CRMS3**. Изменения эффективной скорости передачи данных  $V(t)$  показаны на рис. 9: на рисунке (а) функция  $V(t)$  снята непосредственно как результат деления функций  $W(t)/R(t)$ , а на рисунке (б) – как результат деления функций  $W(t)/R(t)$  с выходов блоков **CRMS3** и **CRMS4**.

В интерактивной системе **MATLAB** блок **CRMS** вычисляет значение корня (**root mean squared value**) из суммы квадратов квантованной переменной  $u(t)$ , усредненной за интервал наблюдения:

$$J = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{v=0}^{L-1} u_v^2} \quad (12)$$

где  $L$  - інтервал спостереження, а  $u_v, v=0,1,2,\dots,L-1$ , - квантовані з кроком  $h$  значення змінної  $u(t)$ .

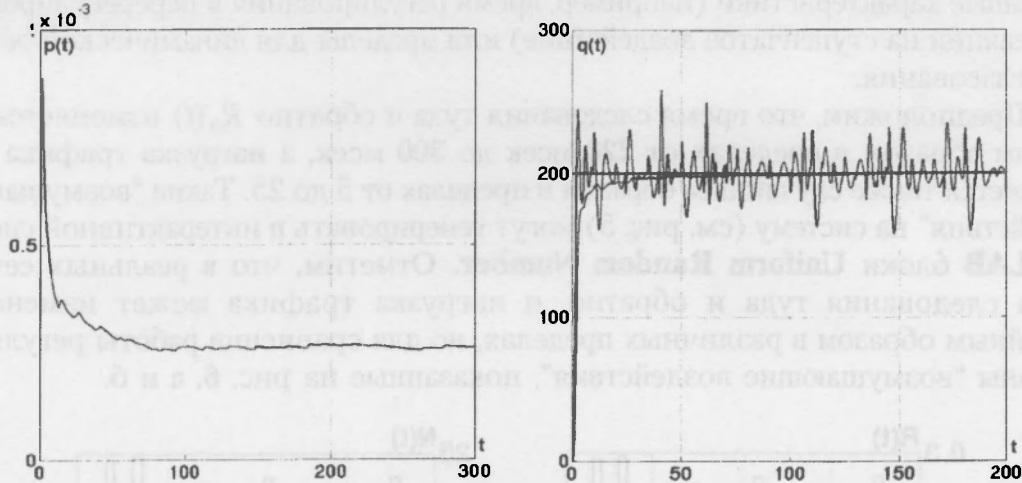


Рис. 7. Вероятность отбрасывания/маркировки пакетов  $p(t)$  и текущая длина очереди  $q(t)$  с нечетким регулятором

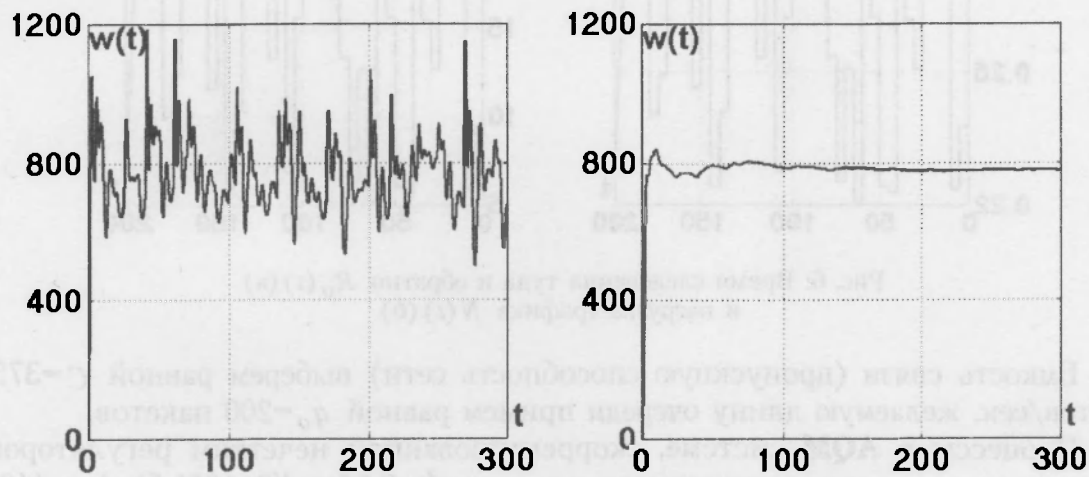


Рис. 8. Изменения размера окна TCP

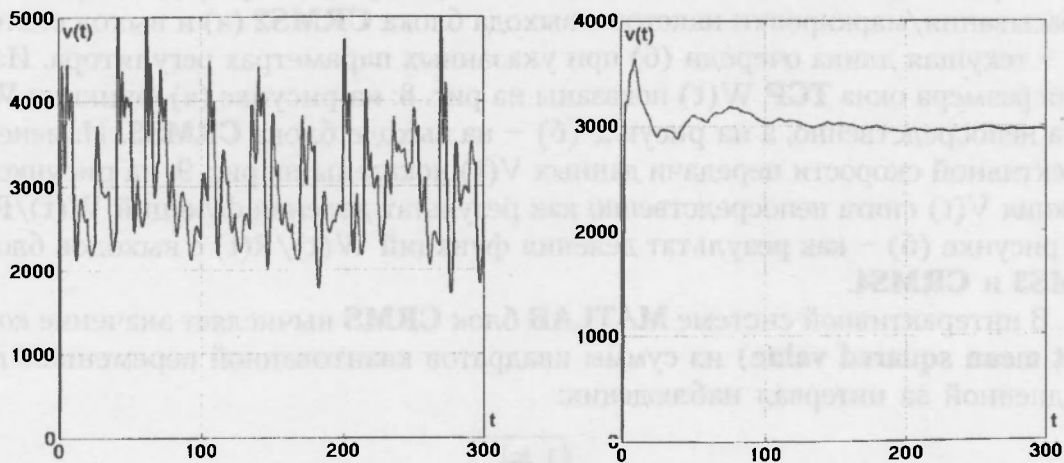


Рис. 9. Эффективная скорость передачи данных

Как видно из осциллограмм, среднее значение вероятности отбрасывания/маркировки пакетов  $p(t)$  достаточно малое – примерно  $2,5 \cdot 10^{-3}$  и в установившемся режиме текущая длина очереди устанавливается с высокой точностью, равной 200 пакетам (см. рис. 7). Установившееся значение размера окна TCP примерно равно 800 пакетов (см. рис. 8), а эффективная скорость передачи данных (см. рис. 9) примерно равна 3000 пакетов в секунду (или при размере пакета в 512 байт равна  $512 \times 8 \times 3000 = 12,228$  Мбит/с).

**Вывод.** Применение разработанного нечеткого регулятора в сети **Ad-Hoc**, работающей с протоколом **TCP**, является эффективным, ибо позволяет удерживать текущую длину очереди, близко к желаемой, при высоком быстродействии и достаточную для практического использования эффективную скорость передачи данных.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Natsheh E., Jantan A., B., Khatun S., Subramaniam S. "Fuzzy Active Queue Management for Congestion Control in Wireless Ad-Hoc", The International Arab Journal of Information Technology, Vol. 4, No. 1, January 2007. pp. 50–59.
2. Tseng Y., Li Y., Chang Y. "On Route Lifetime in Multihop Mobile Ad-Hoc Networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 2, no. 4, pp.366–376, October 2003.
3. Perkins C., Royer E. M., and Das S. R. "Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," available at: <http://www.draft-ietf-manet-aodv-13.txt>, February 2003.
4. Murthy C. S. and Manoj B. S. Ad-Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols, Prentice Hall, 2004.
5. Xiaoyan Hong, Kaixin Xu and Mario Gerla " Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks". Computer Science Department, University of California, Los Angeles, August 2002, IEEE, pp.11-21.
6. Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., Viennot L. "Optimized Link State Protocol for Ad Hoc Networks". IEEE INMIC Pakistan 2001, pp.62–68 .
7. Jacquet P., Laouiti A., Minet P., Viennot L. "Performance of multipoint relaying in ad hoc mobile routing protocols". Networking 2002. Pise (Italy) 2002, pp.387–398.
8. Ying Ge, Thomas Kunz and Louise Lamont "Quality of Service Routing in Ad-Hoc Networks Using OLSR". Proceeding of the 36<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Science (HICSS'03).
9. Julian Hsu, Sameer Bhatia, Dr. Mineo Takai, Dr. Rajive Bagrodia "Performance of Mobile Ad Hoc Networking Routing Protocols in realistic Scenarios". Scalable Network Technologies, Inc., Culver City, CA, pp. 1268–1273.
10. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В.И. Гостев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.

Отримано 12.10.2011