

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ПОТОКОВ ДАННЫХ В МОБИЛЬНОЙ РАДИОСЕТИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ****Польщиков К. А.**

Представлен системный анализ процесса управления интенсивностью потоков данных в мобильной радиосети специального назначения. Выделены элементы анализируемого процесса. Предложены показатели, характеризующие эффективность управления интенсивностью потоков данных. Предложена функциональная модель управления интенсивностью потоков данных в мобильной радиосети специального назначения. Обоснованно применение нейро-нечетких систем для управления интенсивностью отправки данных узлами-источниками, интенсивностью повторных передач и интенсивностью отбрасывания пакетов в транзитных узлах.

Представлено системний аналіз процесу управління інтенсивністю потоків даних в мобільній радіомережі спеціального призначення. Виділені елементи аналізованого процесу. Запропоновані показники, що характеризують ефективність управління інтенсивністю потоків даних. Запропоновано функціональну модель управління інтенсивністю потоків даних в мобільній радіомережі спеціального призначення. Обґрунтовано застосування нейро-нечетких систем для управління інтенсивністю відправлення даних вузлами-джерелами, інтенсивністю повторних передач та інтенсивністю відкидання пакетів в транзитних вузлах.

In the article the system analysis of data flows intensity control in the mobile radio network of the special setting is presented. The elements of analysable process are selected. Indexes, characterizing efficiency of management intensity of flows of data, are offered. Functional model of data flows intensity control in the mobile radio network of the special setting is proposed. Application of the neuro-fuzzy systems for a control of knots-sources information dispatch intensity, a control of repeated transmissions intensity and a control of packets casting-out intensity in transit knots is grounded.

Польщиков К. А.

канд. техн. наук, доц. каф. КИТ ДГМА  
konspol@rambler.ru

УДК 621.396

**Польщиков К. А.**

### **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ПОТОКОВ ДАННЫХ В МОБИЛЬНОЙ РАДИОСЕТИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Мобильные радиосети (Mobile Ad-Hoc Networks, MANET) [1, 2], характеризующиеся случайной топологией, являются перспективным направлением развития телекоммуникационных технологий. Основными особенностями построения мобильной радиосети являются:

- 1) реализация децентрализованного управления компонентами сети;
- 2) отсутствие базовых станций;
- 3) способность каждого узла выполнять функции маршрутизатора.

Перечисленные специфические черты MANET обуславливают наличие у мобильной радиосети следующих преимуществ:

- 1) возможности доставки информации в условиях случайной, динамической топологии;
- 2) высокой живучести;
- 3) быстрого развертывания.

Благодаря указанным преимуществам технология MANET имеет хорошие перспективы, связанные с построением телекоммуникационных сетей, функционирующих в интересах силовых структур (армии, внутренних войск, сил охраны правопорядка, спасательных служб) [3, 4]. Известны примеры, демонстрирующие стремление ряда ведущих стран мира применить мобильные радиосети для решения задач специального (военного) назначения [5, 6]. Мобильную радиосеть, применяемую в интересах той или иной силовой структуры, будем называть мобильной радиосетью специального назначения (МРСН).

Технология MANET основана на применении коммутации пакетов. Абоненты МРСН должны иметь возможность передавать по сети различные виды пакетного трафика. Информационные сообщения, передаваемые в мобильной радиосети, образуют мультимедийный трафик (речевые сообщения, видео) и трафик данных (управляющие сигналы, текстовые сообщения, топографические изображения, другая графическая и табличная информация). Интенсивность передачи информации, инициированной работой какого-либо мультимедийного приложения, достаточно высока и близка к постоянному значению, поэтому такой вид трафика часто именуют потоковым трафиком. Для качественной передачи потокового трафика необходимо минимизировать задержку пакетов и ее дисперсию (джиттер), при этом допускаются незначительные потери пакетов [7, 8]. При передаче данных, напротив, задержки отдельных пакетов на качество передачи данных не влияют, но при этом требуется гарантированная безошибочная доставка каждого пакета, т. е. обеспечение достоверности доставки данных при заданном уровне ее оперативности. Доставка данных без ошибок и потерь достигается с помощью квитирования (подтверждения приемником успешно доставленных пакетов) и повторных передач утраченной информации [9]. Указанные процедуры существенно усложняют процесс передачи данных и увеличивают время доставки сообщений.

Результаты научных исследований показывают, что наличие у мобильной радиосети вышеизложенных преимуществ не является гарантией качественной доставки информации ее абонентам [10, 11]. Доставка данных в МРСН существенно усложняется благодаря следующим особенностям:

- 1) кратковременности существования соединений в результате быстрого изменения сетевой топологии, вызванного мобильностью узлов и влиянием деструктивных факторов;

2) большим значениям вероятности искажения информации, которые вызваны высоким уровнем помех в радиоканалах;

3) высоким значениям вероятности потери пакетов, обусловленной частыми перегрузками сети из-за нестационарности ее трафика.

Это вызывает необходимость поиска эффективных средств, применение которых позволит улучшить качество доставки информации в МРСН.

Анализ существующих средств, используемых для обеспечения качества доставки информации в телекоммуникационных сетях, показал, что подавляющее большинство методов, созданных для рационального распределения сетевых ресурсов, по сути, сводится к управлению интенсивностью информационных потоков [12]. В мобильных радиосетях для эффективной передачи потоков данных можно использовать ряд известных методов управления трафиком, основанных на обратной связи между источником и приемником, например, метод адаптивного изменения окна приема, метод Нагля, метод быстрой повторной передачи, многие методы управления оперативностью отправки подтверждений [7–9].

Интересные идеи заложены в основе методов управления скоростью отправки данных в сеть, адаптивного выбора тайм-аута повторной передачи и вероятности отбрасывания пакетов, поступающих в маршрутизаторы [7–9]. Однако предложенная реализация этих идей основана на применении эвристических алгоритмов и достаточно грубых, приближенных моделей. В результате этого в сети часто принимаются неадекватные управляющие решения, ухудшающие качество доставки информации. Поэтому для повышения оперативности доставки информации в МРСН целесообразно разработать теоретически обоснованные методы управления интенсивностью потоков данных.

Таким образом, с одной стороны, с точки зрения практики, востребованы технологические решения, способствующие повышению оперативности и обеспечению достоверности доставки данных в МРСН, а с другой стороны, с точки зрения теории, ощущается нехватка адекватных моделей и теоретически обоснованных методов эффективного управления интенсивностью потоков данных, направленных на удовлетворение указанных требований.

В этой связи актуальной представляется научная проблема, которая состоит в разработке теоретически обоснованных методов управления интенсивностью потоков данных для повышения оперативности доставки данных в мобильной радиосети специального назначения. Целью статьи является обоснование выбора научного аппарата, применение которого целесообразно для реализации управления интенсивностью потоков данных в МРСН. Для достижения этой цели указанный процесс необходимо исследовать с позиций системного подхода.

Системный подход является универсальной, общенаучной методологией исследования объектов как сложных систем [13]. Он успешно применяется для анализа и синтеза объектов природы, науки и техники, организационных и производственных комплексов. Системный подход – это подход к исследованию объекта (проблемы, явления, процесса) как к системе, с выделением ее элементов, внутренних и внешних связей, оказывающих наибольшее влияние на результаты ее функционирования, и целей каждого элемента, исходя из общего предназначения объекта.

В основе системного подхода лежат следующие важнейшие принципы:

1) принцип цели состоит в том, что при исследовании объекта, прежде всего, необходимо выявить цель его функционирования;

2) принцип единства (целостности) предписывает рассмотрение исследуемого объекта как целого и как совокупности элементов;

3) принцип двойственности означает, что система должна рассматриваться как часть системы более высокого уровня и в то же время как самостоятельная часть, взаимодействующая с внешней средой;

4) принцип функциональности определяет приоритет функций системы над его структурой;

5) принцип структуризации (модульного построения) рекомендует для упрощения анализа выделять в системе отдельные части (модули).

6) принцип связности предписывает учитывать связи системы и ее элементов с другими объектами;

7) принцип неопределенности требует учитывать влияние неопределенностей и случайностей на систему.

Важными компонентами системного подхода являются:

1) альтернативы (варианты) построения или совершенствования системы, посредством которых возможно решение проблемы;

2) критерии и показатели, позволяющие сравнивать различные альтернативы и выбирать наиболее предпочтительные.

Выделяют два основных аспекта системного подхода: познавательный (описательный) и конструктивный. Познавательный аспект состоит в том, что внешние проявления системы (ее целесообразные свойства, а также функции как способы достижения цели) объясняются с помощью ее внутреннего устройства, т. е. состава и структуры.

Конструктивный аспект используется для решения проблемы, связанной с разработкой требуемого объекта (системы). При этом методика системного подхода состоит из следующих этапов [13]:

1) точное и полное определение цели функционирования объекта с позиций системы более высокого уровня;

2) выделение объекта из внешней среды;

3) описание процесса функционирования объекта (определение набора функций, реализуемых разрабатываемой системой и ее элементами, а также взаимодействия элементов системы между собой и со средой);

4) обоснование вариантов построения или совершенствования объекта (выбор соответствующего научного аппарата), посредством чего возможно решение проблемы;

5) определение структуры объекта (состава разрабатываемой системы, внутренних и внешних связей);

6) оценка эффективности функционирования объекта с помощью соответствующих критериев и показателей.

Следует отметить, что указанная методика полностью соответствует приведенным выше принципам системного подхода.

Исследуемым в статье объектом является процесс управления интенсивностью потоков данных в МРСН. Цель этого процесса состоит в повышении оперативности доставки данных (уменьшении среднего времени доставки сообщений) в мобильной радиосети специального назначения. Системой более высокого уровня по отношению к указанному объекту исследования выступает процесс обеспечения качества обслуживания в МРСН. Сформулированная выше цель процесса управления интенсивностью потоков данных хорошо согласуется с целью вышестоящей системы, т. к. повышение оперативности доставки данных в сети способствует обеспечению качества обслуживания ее абонентов.

Выделить объект исследования из внешней среды, определить набор его функций и описать взаимодействие его элементов позволяет функциональная модель управления интенсивностью потоков данных в МРСН.

Схема функциональной модели управления интенсивностью потоков данных в МРСН представлена на рис. 1.

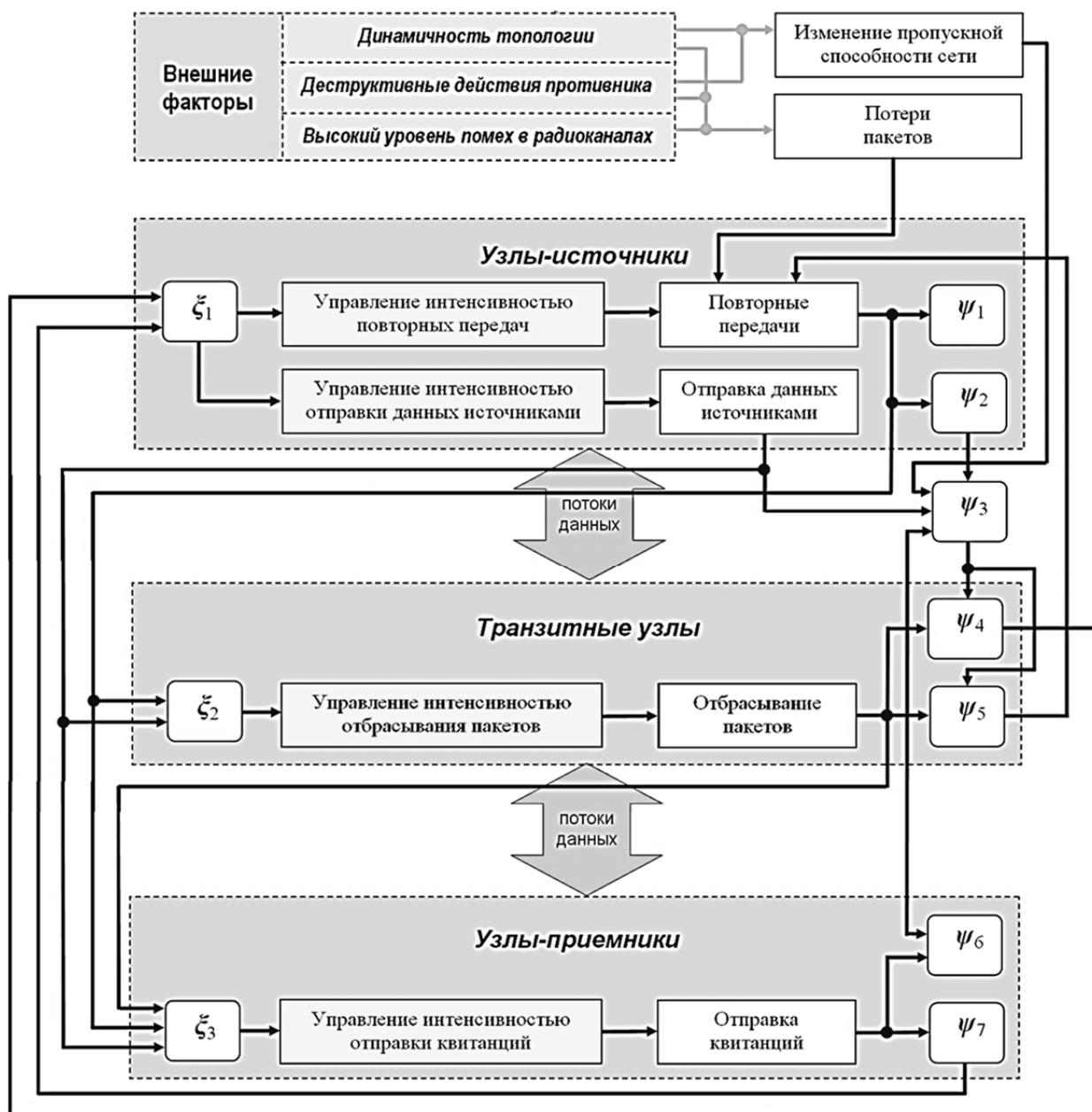


Рис. 1. Схема функциональной модели управления интенсивностью потоков данных в MPCN

Процесс управления интенсивностью потоков данных условно можно разбить на ряд следующих составляющих:

- 1) управление интенсивностью отправки данных узлами-источниками;
- 2) управление интенсивностью повторных передач;
- 3) управление интенсивностью отправки квитанций узлами-приемниками;
- 4) управление интенсивностью отбрасывания пакетов в транзитных узлах.

Остальные процессы в модели выступают в качестве внешней среды по отношению к исследуемому объекту. Функции управления интенсивностью потоков данных в MPCN совпадают с названиями элементов объекта исследования.

Элементы процесса управления интенсивностью потоков данных непосредственно не взаимодействуют друг с другом. Их взаимное влияние проявляется через взаимодействия с другими процессами.

С формированием потоков данных в МРСН непосредственно связаны следующие процессы:

- 1) отправка данных узлами-источниками;
- 2) повторные передачи, вызванные необходимостью восполнения информации, утраченной в процессе доставки по сети вследствие искажения данных из-за канальных помех и потерь пакетов по причине перегрузок элементов МРСН;
- 3) отбрасывание пакетов в транзитных узлах для предупреждения перегрузок;
- 4) отправка квитанций узлами-приемниками для контроля достоверности доставки данных.

В соответствии с принципом неопределенности системного подхода рассматриваемая функциональная модель учитывает влияние на исследуемый объект неопределенностей и случайностей, обусловленные наличием внешних факторов:

- 1) динамичности топологии МРСН;
- 2) деструктивных действий противника;
- 3) высокого уровня помех в радиоканалах.

Функционирование МРСН сопровождается потерями пакетов вследствие преждевременных разрывов соединений, вызванных динамичностью топологии МРСН и деструктивными действиями противника. Кроме того, потери пакетов, могут быть вызваны искажениями данных вследствие помех в радиоканалах сети. Динамичность топологии и внешние деструктивные воздействия приводят к случайному изменению пропускной способности сети, что также является важной особенностью МРСН.

Влияние перечисленных выше внешних факторов на процесс управления интенсивностью потоками данных в МРСН учитывают следующие величины:

$\varphi_1$  – величины, характеризующие изменение пропускной способности сети, обусловленное влиянием внешних факторов;

$\varphi_2$  – величины, характеризующие потери пакетов, обусловленные влиянием внешних факторов.

В процессе управления интенсивностью потоками данных в МРСН используются следующие входные величины:

$\xi_1$  – величины, характеризующие длительность ожидания квитанций;

$\xi_2$  – величины, характеризующие интенсивность поступления пакетов в транзитные узлы;

$\xi_3$  – величины, характеризующие интенсивность поступления пакетов в узлы-приемники.

Управление интенсивностью потоками данных сводится к получению значений следующих выходных величин:

$c_1$  – величины, характеризующие интенсивность повторных передач;

$c_2$  – величины, характеризующие интенсивность отправки данных источниками;

$c_3$  – величины, характеризующие интенсивность отбрасывания пакетов в транзитных узлах;

$c_4$  – величины, характеризующие интенсивность отправки квитанций.

Эффективность управления интенсивностью потоков данных в МРСН характеризует следующий набор величин (частных показателей):

$\psi_1$  – величины, характеризующие длительность бесполезного ожидания квитанций;

$\psi_2$  – величины, характеризующие избыток повторных передач;

$\psi_3$  – величины, характеризующие несоответствие между интенсивностью отправки данных узлами-источниками и доступной пропускной способностью сети;

$\psi_4$  – величины, характеризующие задержки в очередях транзитных узлов;

$\psi_5$  – величины, характеризующие потери пакетов, вызванные перегрузками в транзитных узлах;

$\psi_6$  – величины, характеризующие избыток передачи по сети квитанций (служебных пакетов);

$\psi_7$  – величины, характеризующие задержки в узлах-приемниках при отправке квитанций.

Локальные цели управления интенсивностью потоков данных в МРСН состоят в уменьшении значений показателей  $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_7\}$ , что приводит к достижению основной цели – к уменьшению среднего времени доставки сообщений.

Наличие в модели большого числа связей, взаимных зависимостей и замкнутых контуров свидетельствует о сложном характере взаимодействия анализируемых процессов. Например, зависимость показателя  $\psi_1$  от других величин можно представить в виде:

$$\psi_1 = f_1(\varphi_2, c_1, \xi_1, \psi_4, \psi_7, \psi_5), \quad (1)$$

где

$$\psi_5 = f_5(c_3, \xi_2, c_1, c_2, \xi_1, \varphi_2, \psi_4, \psi_7), \quad (2)$$

$$\psi_4 = f_4(\psi_3, c_3, \xi_2, c_2, \xi_1, c_1, \varphi_2), \quad (3)$$

$$\psi_7 = f_7(c_4, \xi_3, c_1, c_2, \xi_1, c_3, \xi_2, \varphi_2), \quad (4)$$

где

$$\psi_3 = f_3(\varphi_1, c_1, c_2, \xi_1, \psi_6, \psi_2), \quad (5)$$

где

$$\psi_2 = f_2(\varphi_2, c_1, \xi_1, \psi_4, \psi_7), \quad (6)$$

$$\psi_6 = f_6(c_4, \xi_3, c_1, c_2, \xi_1, \varphi_2, \psi_4, \psi_7). \quad (7)$$

Значения показателей  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_7$  зависят от многих факторов (активности пользователей в отправке по сети сообщений, мобильности узлов, деструктивных действий противника, оперативного добавления в сеть новых узлов, искажений данных вследствие помех в каналах сети), а также характеристик отправки данных узлами-источниками, повторных передач, отбрасывания пакетов в транзитных узлах для предупреждения перегрузок, отправки квитанций узлами-приемниками. С течением времени влияние указанных факторов усиливается или ослабляется, динамически изменяются значения перечисленных выше характеристик, т.е. меняется ситуация в сети.

Для эффективного управления интенсивностью потоков данных необходимо достоверно знать, в какой ситуации сеть оказалась в текущий момент времени, а также каково будет состояние ее элементов в ближайшем будущем. Казалось бы, получить точные сведения о текущем состоянии сети можно, измерив значения многочисленных параметров на всех ее участках. Однако сбор и доставка этой информации до узлов, в которых осуществляется управление интенсивностью потоков данных, имеют существенные недостатки: во-первых, они делают архитектуру сети более сложной, во-вторых, создают нежелательный служебный трафик и, в-третьих, обязательно происходят с некоторой задержкой, наличие которой

способствует частичной (или полной) утрате актуальности этой информации. Поэтому судить о ситуации в сети приходится по значениям ограниченного количества параметров, которые в большей степени характеризуют состояние сети не в настоящее время, а в прошлом.

Сложившуюся в сети ситуацию косвенно характеризуют величины  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  и  $\xi_3$ , используемые для получения входных параметров при управлении интенсивностью потоков данных в МРСН. Следует отметить, что располагая значениями этих величин, весьма проблематично адекватно оценить текущую ситуацию в сети, и тем более сложно достоверно предугадать ее будущее состояние. При этом, например, отсутствуют точные сведения о том, какой промежуток времени пройдет до получения квитанции на только что отправленный пакет, насколько будет длительным всплеск интенсивности трафика и каких значений достигнут при этом очереди пакетов в транзитных узлах.

Анализ разработанной функциональной модели показывает, что управление интенсивностью потоков данных в МРСН происходит в условиях неопределенности, характеризующейся наличием неполной, размытой, неточной информации о состоянии элементов этой сети в текущем времени и в будущем. Аналитических моделей, адекватно представляющих зависимости (1)–(7), к сожалению, не существует, а применение приближенных моделей в процессе управления интенсивностью потоков данных в сети не дает приемлемых результатов. Эффективным средством управления в таких условиях является применение систем нечеткого вывода [14–17]. Основное преимущество этих систем – способность использовать условия и методы решения задач, которые описаны на языке, близком к естественному [15]. Центральное место в процедурах нечеткого вывода занимает база правил нечетких продукций.

Однако существуют отдельные классы прикладных задач, в которых построение нечетких правил связаны со значительными трудностями концептуального характера. К ним относятся задачи распознавания образов, экстраполяции и интерполяции функциональных зависимостей, классификации и прогнозирования, нелинейного и ситуационного управления, а также интеллектуального анализа данных. Общей особенностью подобных задач является существование некоторой зависимости или отношения, связывающего входные и выходные переменные модели исследуемой системы. При этом выявление и определение данной зависимости в явном аналитическом виде не представляется возможным из-за нехватки информации об исследуемой предметной области или сложности учета многих различных факторов, которые влияют на характер данной взаимосвязи [15].

Известно, что классическим системам с нечеткой логикой, не способным автоматически обучаться, присущ существенный недостаток, состоящий в том, что набор нечетких правил, вид и параметры функций принадлежности, описывающих входные и выходные переменные системы, а также вид алгоритма нечеткого вывода, выбираются субъективно экспертом-человеком, поэтому они могут быть не достаточно адекватными действительности [14]. Для устранения отмеченного недостатка используют аппарат систем нейро-нечеткого вывода [15]. Нечеткая нейронная сеть – это многослойная нейронная сеть, в которой слои выполняют функции элементов системы нечеткого вывода. Нейроны такой сети характеризуются набором параметров, настройка которых осуществляется в процессе обучения, как в обычных нейронных сетях. Такие системы являются, в сущности, гибридными и объединяют в себе преимущества нейронных сетей и систем нечеткого вывода. С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, обладающих наглядностью и простотой содержательной интерпретации. С другой стороны, для построения правил нечетких продукций используются методы нейронных сетей, что делает этот процесс менее сложным для исследователей. Существует достаточное количество примеров успешного использования систем нейро-нечеткого управления в различных отраслях науки и техники [15, 16]. Поэтому вполне оправданной является попытка применить нейро-нечеткие системы для управления интенсивностью потоков данных в МРСН.

## ВЫВОДЫ

Впервые разработана функциональная модель управления интенсивностью потоков данных в МРСН. В ней, в отличие от известных моделей, представлены взаимосвязи, отражающие влияние различных процессов и факторов на величины, характеризующие:

- длительность бесполезного ожидания квитанций;
- избыток повторных передач и циркулирующих по сети квитанций;
- несоответствие между интенсивностью отправки данных узлами-источниками и доступной пропускной способностью сети;
- задержки пакетов в очередях транзитных узлов;
- задержки квитанций в узлах-приемниках;
- потери пакетов, вызванные перегрузками в транзитных узлах.

Использование предложенной модели позволило обосновать применение в МРСН нейро-нечетких систем для управления интенсивностью отправки данных узлами-источниками, интенсивностью повторных передач и интенсивностью отбрасывания пакетов в транзитных узлах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Corson S. *Mobile Ad hoc Networking (MANET) : Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations* [Электронный ресурс] / S. Corson, J. Macker // RFC 2501, Jan. 1999. – Режим доступа: <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2501.html>.
2. Tavli B. *Mobile Ad Hoc Networks : Energy-Efficient, Real-Time Data Communications* / B. Tavli, W. Heinzelman. – Dordrecht: Springer, 2006. – 265 p.
3. *Mobile Ad Hoc Networks (MANETs)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.antd.nist.gov/wahn\\_mahn.shtml](http://www.antd.nist.gov/wahn_mahn.shtml).
4. Романюк В. А. *Еволюція тактичних радіомереж* / В. А. Романюк // *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення* : збірник матеріалів VI науково-практичного семінару. – К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2011. – С. 45–52.
5. Finley K. *DARPA and Raytheon Building New Ad-Hoc Mobile Network for the Military* [Электронный ресурс] / K. Finley. – Режим доступа : <http://www.readwriteweb.com/enterprise/2011/01/darpa-and-raytheon-building-ne.php>.
6. Rising D. *First Use of Military Ad Hoc Networks* [Электронный ресурс] / D. Rising. – Режим доступа: <http://www.ietf.org/mail-archive/web/manet/current/msg02052.html>.
7. Куроуз Дж. *Компьютерные сети* : пер. с англ. / Дж. Куроуз, К. Росс. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 765 с.
8. Вегениа Ш. *Качество обслуживания в сетях IP* : пер. с англ. / Ш. Вегениа. – М. : Вильямс, 2003. – 386 с.
9. Кучерявый Е. А. *Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет* / Е. А. Кучерявый. – СПб. : Наука и техника, 2004. – 336 с.
10. Thompson D. *Dynamic Quality-of-Service for Mobile Ad Hoc Networks* / D. Thompson, N. Schult, M. Mirhakkak – Boston : MobiHoc, 2000.
11. *Дослідження роботи протоколу маршрутизації OLSR в мобільних Ad-Hoc мережах* / М. О. Алексєєв, Я. А. Алексєєва, Г. В. Мазурук, М. Ю. Терновой // *Наукові записки УНДІЗ*. – К. : УНДІЗ, 2008. – № 6 (8). – С. 63–71.
12. Польщиков К. О. *Методи управління інтенсивністю потоків даних в мобільній радіомережі спеціального призначення* / К. О. Польщиков // *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення* : збірник матеріалів V науково-практичного семінару. – К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2009. – С. 41–47.
13. Романов В. Н. *Системный анализ для инженеров* / В. Н. Романов. – СПб. : СЗГЗТУ, 2006. – 186 с.
14. Рутковская Д. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы* / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
15. Леоненков А. В. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH* / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 703 с.
16. Усков А. А. *Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика* / А. А. Усков, А. В. Кузьмин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 143 с.
17. Гостев В. И. *Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления* / В. И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с.