

На правах рукописи



Чан Куок Тоан

**АЛГОРИТМ И МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО НЕЧЁТКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАКЕТОВ
В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации
(информационные технологии и промышленность)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2018

Работа выполнена на кафедре «Связь» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»).

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Сорокин Александр Александрович.

Официальные оппоненты: **Львов Алексей Арленович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский государствен-
ный технический университет имени Га-
гарина Ю.А.», кафедра «Информацион-
но-коммуникационные системы и
программная инженерия»,
профессор;

Семенов Евгений Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Волгоградский государст-
венный университет», кафедра телеком-
муникационных систем,
заведующий кафедрой.

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева».

Защита диссертации состоится «27» сентября 2018 г. в ____ часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.028.08, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005, г. Волгоград, пр-кт им. В.И. Ленина, д. 28, ауд. 209

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета и на сайте <http://vstu.ru>

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Орлова Юлия Александровна

Актуальность темы: В настоящее время наблюдается интенсивное развитие сетей передачи данных (СПД), по которым осуществляется передача информации в виде голосового трафика, файлов, мультимедиа приложений. Сетевая инфраструктура является важным элементом, используемым для доставки информации конечному пользователю, поэтому от качества её работы зависит успешность деятельности оператора связи на рынке в целом. В отличие от трафика классических телефонных сетей, в СПД трафик имеет особенности, связанные с изменением нагрузки. Особенности эти вызваны разнообразностью оказываемых услуг и спецификой работы используемых пользователем сервисов и протоколов, обеспечивающих работу сети в целом. Вследствие этого появляются всплески интенсивности трафиковой нагрузки, что приводит к возникновению очередей пакетов в узлах связи. В случае переполнения очередей происходят потери пакетов, что ведёт к деградации качества оказываемых сетью услуг и передаваемой информации. Современные методики управления трафиком за счёт распределения информационных пакетов в очередях не обладают необходимой адаптивностью для компенсации изменения характера трафиковой нагрузки.

Степень научной разработанности темы: Среди работ российских учёных можно выделить труды Ю. В. Гайдамаки, В. А. Ефимушкина, Е. А. Кучерявого, А. В. Рослякова, К. Е. Самуйлова, С. Н. Степанова, И. И. Цитовича, Г. Г. Яновского и др., посвящённых вопросам управления сетями, передающими пакетный информационный трафик, но вопросы управления передачей трафика в условиях сильных пульсаций поступающей нагрузки при обеспечении низких потерь пакетов в работах рассмотрены недостаточно. Сокращением потерь информационных пакетов при условиях сильных пульсаций трафика за счёт использования систем интеллектуального управления занимались учёные S. Floyd, C.F. Wu, C. Chrysostomou, S. Athuraliya, и др. Предлагаемые ими решения ориентированы на работу в определённых условиях, вопросы развития методов повышения адаптивности систем управления трафиковой нагрузкой в СПД требуют дальнейшего развития.

Объект исследования: управление трафиком информационных пакетов в СПД.

Предмет исследования: алгоритмы, методики и методы управления трафиком информационных пакетов в СПД.

Цель исследования: повышение эффективности работы сети передачи данных за счёт разработки системы управления трафиком информационных пакетов.

Для достижения сформулированной цели необходимо решение следующих задач.

1. Проанализировать методики управления трафиком информационных пакетов в СПД, показать причины, приводящие к возникновению потерь информационных пакетов, описать результаты влияния потерь информационных пакетов на качество передаваемой информации.
2. Предложить методику повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в СПД на основе мониторинга загрузки буферов се-

тевых устройств, позволяющую сократить потери информационных пакетов за счёт более полного учёта специфики поступающей нагрузки.

3. Разработать метод адаптации нечёткой системы управления (СУ) трафиком информационных пакетов в СПД на основе мониторинга загрузки буферов сетевых устройств, позволяющий адаптироваться системе управления к изменениям интенсивности и специфике поступающей трафиковой нагрузки.

4. Проверить эффективность использования предложенных теоретических положений средствами имитационного моделирования.

Методология и методы исследования: во время исследований использованы методы системного анализа, теории управления, теории нечётких множеств и нечёткой логики, методы теории нейронных сетей, теории передачи информации математическое и имитационное моделирование.

Научная новизна работы, заключается в том, что:

1. Предложена методика повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в СПД, отличающаяся использованием адаптивного нечёткого вывода, для обработки информации о перегрузке сети и формирования управляющих воздействий, на основании которых происходит изменение интенсивности передачи трафика между узлами-источниками и получателями (п. 4 п. с.).

2. Разработан метод адаптации нечёткой системы управления трафиком информационных пакетов в СПД на основе мониторинга загрузки буферов сетевых устройств, отличающийся использованием нечёткой нейронной сети для формирования управляющих воздействий, используемых при корректировке функций принадлежности входных переменных и области определения выходной переменной, используемых нечётким контроллером (п. 6 п. с.).

3. Разработан алгоритм обучения нечёткой нейронной сети, отличающийся использованием коэффициента инерции изменения погрешности обучения, величина которого зависит от мощности термножеств, описывающих входные переменные, позволяющий повысить точность вычислений сети за заданное количество итераций обучения (п. 5 п. с.).

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработаны методика, метод и алгоритм для адаптивного управления трафиком информационных пакетов, которые позволяют корректировать выработку управляющих воздействий с учётом изменения специфики передачи трафика.

Практическая значимость работы: предложенные теоретические положения позволяют повысить эффективность управления трафиком информационных пакетов в СПД за счёт сокращения потерь пакетов информации и увеличения полезной пропускной способности каналов передачи данных, разработаны программы «Система моделирования адаптивным процессом нечёткого управления очередями информационных пакетов в телекоммуникационных сетях» и «Система нечёткого управления очередью в сетевых узлах», зарегистрированные в федеральном институте промышленной собственности (ФИПС). Результаты работы используются в ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», на предприятии «Indochina Telecom Mobile» (Вьетнам), в Институте морских научно-технологических исследова-

ний (Вьетнам). Основные результаты работы получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы кафедры «Связь»: «Перспективные высокоскоростные инфокоммуникационные системы», в период с 2014 по 2016 гг., номер гос. рег. 01201450580.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в сети передачи данных.
2. Метод адаптации нечёткой системы управления трафиком информационных пакетов в сети передачи данных на основе мониторинга загрузки буферов сетевых устройств.
3. Алгоритм обучения нечёткой нейронной сети, основанный на использовании коэффициента инерции изменения погрешности обучения, величина которого зависит от мощности терммножеств, описывающих входные переменные.

Достоверность результатов исследований подтверждается корректностью использования апробированных теоретических методов, сравнением полученных результатов с результатами, полученными другими специалистами, использованием известных программных пакетов в области моделирования сетей передачи данных и создания систем нечёткого вывода, апробацией результатов исследований среди специалистов в области системного анализа и управления системами передачи и обработки информации.

Апробация работы: основные результаты исследований докладывались на всероссийских и международных конференциях: 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2015, Rostov-on-Don, Russia, 2015 г.), Московский семинар по электронным и сетевым технологиям совместно с Сибирской конференцией по управлению и связи (MWENT-2018, Москва, 2018 г.), XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26» (Саратов, 2013 г.), I Молодёжная международная конференция «Информационные технологии и технологии коммуникаций: современные достижения» (Астрахань, 2017 г.), VI Конгресс молодых учёных (Санкт-Петербург, 2016 г.), 25-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2018» (Москва, 2018 г.), XX Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартовского государственного университета (Нижневартовск, 2018 г.), Научная сессия Волгоградского государственного университета (Волгоград, 2018 г.), Международные студенческие научно-технические конференции и Международные научные конференции научно-педагогических работников АГТУ (Астрахань, 2014–2018 гг.).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 12 научных работ, среди которых 4 в журналах из перечня ВАК, 2 проиндексированы в международных научных базах цитирования SCOPUS, IEEE Xplore, 4 доклада на международных и всероссийских конференциях, получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора: все основные теоретические положения, приведённые в диссертации, получены автором лично в работах, выполненных в соавторстве, автор принимал участие в формулировке целей, постановке и решении теоретических и практических задач, анализе результатов и формировании выводов, подготовке публикаций и других научных работ.

Структура и объём диссертации: работа состоит из введения, 4-х глав, выводов и заключения, списка использованных источников, приложений. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, 26 таблиц, 67 рисунков, 59 страниц приложений, списка литературы из 146 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, приведены основные положения, которые вынесены на защиту, описаны внедрение и апробация результатов диссертации.

В первой главе проведено исследование тенденций развития СПД, проанализированы основные методики управления трафиком информационных пакетов за счёт регулирования очередей в узлах СПД, формализована задача повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в СПД.

Как показал проведённый анализ, одной из тенденций в области развития СПД является непрерывное увеличение объёмов передаваемого трафика. По данным компании Cisco, до 2021 г. объём передаваемого мирового трафика приблизится к 278 Эксабайтам в месяц, что примерно втрое превышает уровень переданного трафика за 2016 г. Как показывает опыт эксплуатации СПД, «узким» местом во время передачи информации является оборудование, распределяющее потоки транзитного трафика между отправителями и получателями информации. Спецификой пакетного трафика является наличие высоких пиковых нагрузок. Возникновение подобных пиков, часто превышающих пропускную способность каналов, приводит к образованию и переполнению очередей в буферах портов оборудования СПД. В результате переполнения буферов происходит потеря пакетов, что приводит к повторной их передаче узлами отправителями. В результате подобного процесса происходит дополнительное увеличение трафиковой нагрузки.

Для предотвращения перегрузок используются различные методики управления трафиком информационных пакетов, основанные на мониторинге буферов и других параметров сетевых устройств. В результате оценки состояния буфера производится формирование управляющих воздействий (УВ), которые доставляются узлу-источнику, и он снижает интенсивность передачи трафика. Анализ методик управления трафиком показал, что распространение получили методики, основанные на отбрасывании пакетов в случае переполнения буфера (Tail Drop), его ограничения связаны с тем, что узлам отправителям приходится дублировать передачу «отброшенных» пакетов, это вызывает снижение качества предоставляемых услуг; развитием данного направления стало использование методик, у которых вероятность отбрасыва-

ния пакетов зависит от уровня загрузки буферов сетевого устройства – RED (Random Early Detection) и REM (Random Exponentially Marking), а в дальнейшем в методиках RED и REM процедура отбрасывания была заменена на процедуру маркирования, которая к пакету, вызвавшему перегрузку, добавляет маркер. Маркированный пакет доставляется узлу-получателю, а узел-получатель отправляет узлу-отправителю извещение о перегрузке, в результате чего он снижает интенсивность передачи. Ограничением методик является предположение, что интенсивность поступления трафика подчинена вероятностным законам, подобное часто не справедливо при передаче пакетного трафика. Для компенсации ограничения предложены доработанные методики RED и REM, в которых вероятность отбрасывания (или маркирования) пакета определяется при помощи системы нечёткого вывода (СНВ) – FEM (Fuzzy Explicit Marking), FUZREM (Fuzzy REM). Ограничением методик стало то, что области значения, определения и форма функций принадлежности (ФП) входных переменных имеют статичный характер на протяжении всего периода обслуживания трафика; в качестве ФП используются функции треугольной и трапецеидальных форм; в результате снижается адекватность УВ при изменении специфики поступающего трафика и его влияния на уровень загрузки буферов.

Таким образом, дальнейшие усилия в работе направлены на разработку теоретических положений, реализующих адаптивное управление трафиком информационных пакетов в СПД. В качестве основного критерия эффективности работы СУ принимается вероятность потери пакета – P_{lost}^{pack} , при этом параметры L_{line}^{pack} – коэффициент загрузки линии, $T_{stab.que}^{pack}$ – время стабилизации количества пакетов в буфере при резком изменении интенсивности трафиковой нагрузки $\lambda_{pack}(t)$, $T_{p.in.q}$ – время пребывания пакета в очереди не должны быть хуже существующих. Формально это можно представить в виде:

$$P_{lost}^{pack}[\lambda_{pack}(t)] \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$L_{line}^{pack}[\lambda_{pack}(t)] \geq L_{line}^{cym}[\lambda_{pack}(t)], \quad (2)$$

$$T_{stab.que}^{pack}[\lambda_{pack}(t), v_{\lambda_{pack}}(t)] \leq T_{stab.que}^{cym}[\lambda_{pack}(t), v_{\lambda_{pack}}(t)], \quad (3)$$

$$T_{p.in.q}^{нов}[\lambda_{pack}(t)] \leq T_{p.in.q}^{cym}[\lambda_{pack}(t)], \quad (4)$$

где $v_{\lambda_{pack}}(t)$ – скорость изменения интенсивности поступающей нагрузки.

Соотношения (1)–(4) описывают условия достижимости цели исследования, позволяют перейти к разработке теоретических методов по повышению эффективности передачи трафика информационных пакетов в СПД.

Во второй главе предложена методика повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в СПД.

Для формирования УВ производится измерение следующих характеристик в процессе передачи трафика: интенсивность поступающего трафика $\lambda_{pack}^1(t)$, пропускная способность исходящего канала C_{out} , пропускная спо-

способность входящего канала C_{input} . В случае, если $\lambda_{pack}^1(t) > C_{out}$, в буферах заданного узла N_i начинают накапливаться пакеты. Если величина пакетов превышает рекомендованную длину очереди $q_{pr.dt}$, то производится выполнение следующей последовательности операций.

1. В дискретные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n : \Delta t = t_{n-1} - t_n = const, \Delta t \rightarrow 0, n \neq \infty$, производится измерение загрузки буфера узла и дополнительного параметра состояния узла – χ_{t_n} , в каждый из моментов времени t_n .

2. Производится вычисление меры перегрузки узла W_{t_n} .

3. Результат вычисления W_{t_n} отправляется в делитель, где происходит разделение результата на две одинаковые копии: $W_{t_n}^{cp.1} = W_{t_n}^{cp.2} = W_{t_n}$.

4. $W_{t_n}^{cp.1}$ отправляется на нечёткий контроллер, а $W_{t_n}^{cp.2}$ в линию задержки.

5. На нечёткий контроллер поступает два сигнала $W_{t_n}^{cp.1}$ и $W_{t_{n-1}}^{cp.2}$.

6. С использованием величин $W_{t_n}^{cp.1}$ и $W_{t_{n-1}}^{cp.2}$ в нечётком контроллере производится определение вероятности маркирования пакета P_q , который стал причиной превышения $q_{pr.dt}$, процедура описывается выражением:

$$P_q = F_{P_q}(W_{t_n}^{cp.1}, W_{t_{n-1}}^{cp.2}), \quad (5)$$

реализация оператора F_{P_q} зависит от типа параметров $W_{t_n}^{cp.1}$ и $W_{t_{n-1}}^{cp.2}$.

7. Производится маркирование пакета, вызвавшего перегрузку с вероятностью P_q .

8. Маркированный пакет отправляется узлу-получателю информации.

9. Узел-получатель формирует управляющий сигнал узлу-отправителю для сокращения интенсивности поступающей нагрузки.

10. Параллельно, в случае превышения в буфере уровня очереди выше рекомендованного значения на величину Δq_{max} , происходит формирование отрицательного прецедента – P_q^- , а если превышения не наблюдается, то прецедент формируется положительный – P_q^+ :

$$d_{prec} = \begin{cases} P_q^+, & q_{t_n} - q_{pr.dt} \leq \Delta q_{max} \\ P_q^-, & q_{t_n} - q_{pr.dt} > \Delta q_{max} \end{cases}, \quad (6)$$

11. Отрицательный прецедент корректируется за счёт дополнительного приращения вероятности маркирования пакета ΔP_q^- :

$$P_q = F_{P_q}(W_{t_{n-1}}, W_{t_n}) + \Delta P_q^- : d_{prec} = P_q^-, \quad q_{t_n} - q_{pr.dt} > \Delta q_{max}, \quad (7)$$

12. Формирование обучающей выборки из скорректированных отрицательных и положительных прецедентов:

$$\begin{aligned} p_q^+ &= \langle W_{t_{n-1}}, W_{t_n}, P_q, \rangle \\ p_q^- &= \langle W_{t_{n-1}}, W_{t_n}, \Pi_q, \rangle, \end{aligned} \quad (8)$$

13. Запуск процедуры обучения системы адаптации происходит, если отношение количества отрицательных прецедентов ξ^- к общему количеству прецедентов ξ превышает величину v :

$$d_{corr} = \begin{cases} 1, & v < \xi^- / \xi : \xi = \xi^+ + \xi^- \\ 0, & v \geq \xi^- / \xi : \xi = \xi^+ + \xi^- \end{cases}, \quad (9)$$

где ξ^+ – количество положительных прецедентов, если $d_{corr}=1$, производится запуск обучения системы адаптации.

14. В результате обучения формируются УВ – M_S для корректировки нечёткого контроллера, как правило, это сигналы, уточняющие параметры ФП входных переменных и области определения выходной переменной.

15. Корректировка системы обработки информации в нечётком контроллере.

Схема реализации методики для повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в СПД приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема реализации методики для повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в СПД

В случае использования в качестве параметра W_{t_n} величины Pr_{t_n} – перегрузки узла в момент времени t_n , под параметром χ_{t_n} понимаются величины: x_{t_n} – скорость поступления пакетов и пропускная способность канала C_{input} . Параметр Pr_{t_n} определяется как зависимость от переменных:

$$Pr_{t_n} = F_{Pr}(Pr_{t_{n-1}}, q_{t_n}, q_{pr.dn}, x_{t_n}, C_{input}, \alpha, \gamma), \quad (10)$$

где $Pr_{t_{n-1}}$ – перегрузка в момент времени t_{n-1} , α и γ – вспомогательные константы, рекомендованные значения которых составляют 0,1 и 0,001 соответственно. В качестве оператора F_{Pr} может использоваться соотношение, применяемое для вычисления перегрузки в методике REM. Величина P_q с учётом (5) определяется соотношением вида:

$$P_q = F_{P_q}(Pr_{t_{n-1}}, Pr_{t_n}), \quad (11)$$

Для реализации оператора F_{P_q} используется CHB Sugeno. Для этого производится представление переменных Pr_{t_n} и $Pr_{t_{n-1}}$ при помощи ФП, имеющих аналогичный внешний вид, как показано на рисунке 2.

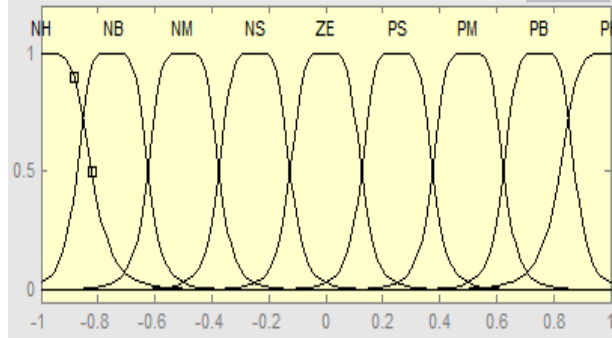


Рисунок 2 – ФП переменной Pr_{t_n} и $Pr_{t_{n-1}}$

Выходная переменная описывается в виде терммножества $\{p_j^q\}$, где j количество термов, а каждому терму соответствует численное значение:

$$P_q = \{p_j^q\} \{z, t, vs, ms, s, b, mb, vb, h\} = \{0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.635, 0.75, 0.875, 1\}, \quad (12)$$

При помощи экспертной группы формируется база знаний, которая состоит из правил вида:

$$\text{Rule \# } \kappa : Pr_{t_n} = t_{Pr_{t_n}}^\psi \wedge Pr_{t_{n-1}} = t_{Pr_{t_{n-1}}}^\varphi \Rightarrow P_q = p_j^q, \quad (13)$$

где κ номер правила, $t_{Pr_{t_n}}^\psi$ и $t_{Pr_{t_{n-1}}}^\varphi$ – значение термов, при помощи которых описываются переменные Pr_{t_n} и $Pr_{t_{n-1}}$; ψ и φ – номера термов из соответствующих терммножеств. Совокупность правил вида (13) с учётом значений входных переменных обобщается по алгоритму нечёткого вывода Sugeno. Результат взаимодействия переменных Pr_{t_n} и $Pr_{t_{n-1}}$ показан на рисунке 3.

Если загрузка буферов узла СПД превысила критическое значение, то запустится механизм адаптации, при помощи которого корректируются ФП переменных Pr_{t_n} и $Pr_{t_{n-1}}$ и область значений переменной P_q .

С учётом специфики особенностей подобный принцип управления трафиком информационных пакетов за счёт мониторинга состояния буферов и каналов узла целесообразно было назвать AFREM (англ. Adaptive FuzzyREM). Аналогично с использованием предложенной методики был модернизирован

принцип, основанный на мониторинге состояния буфера узла, который получил название AFRED (англ. Adaptive Fuzzy-RED).

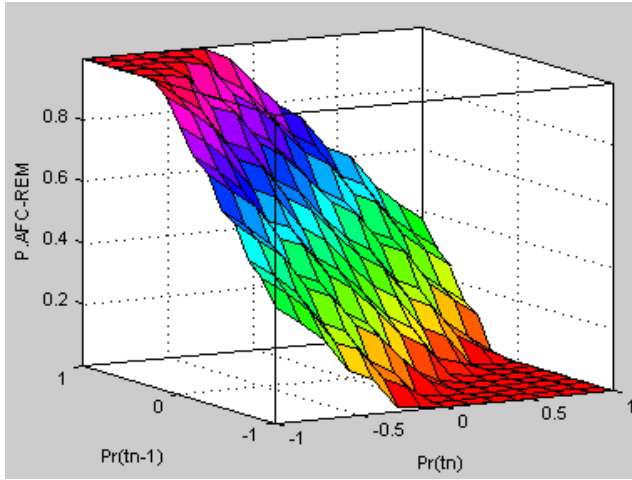


Рисунок 3 – Зависимость значений P_q от переменных Pr_{t_n} и $Pr_{t_{n-1}}$

Следующим этапом проведения исследований стала разработка метода адаптации нечёткого контроллера для случая изменения специфики передаваемого трафика или выявления, что ФП будут недостаточно точно описывать характер поступающей нагрузки.

В третьей главе предложен метод для адаптации нечёткой СУ передачей трафика информационных пакетов за счёт мониторинга со-

стояния узла. Метод позволяет адаптироваться СУ к изменениям специфики поступающей трафиковой нагрузки и устранения неточностей, возникших при формировании ФП. Метод заключается в формировании УВ для корректировки ФП входных переменных и области определения выходной переменной, используемых нечётким контроллером. Операции метода.

1. На вход системы адаптации (СА) подаются положительные и отрицательные прецеденты – $p_q^+ = \langle W_{t_{n-1}}, W_{t_n}, P_q, \rangle$ и $p_q^- = \langle W_{t_{n-1}}, W_{t_n}, P_q, \rangle$. Значения входных переменных $W_{t_{n-1}}$ и W_{t_n} описываются терммножествами, каждому терму соответствует ФП:

$$\begin{aligned} W_{t_n} : A_{W_{t_n}} &= \{A_{W_{t_n}}^i\}, i = 1, 2, \dots, r \\ W_{t_{n-1}} : A_{W_{t_{n-1}}} &= \{A_{W_{t_{n-1}}}^j\}, j = 1, 2, \dots, r' \end{aligned} \quad (14)$$

На начальной стадии формирования параметры ФП аналогичны ФП переменных, которые используются в нечётком контроллере. ФП задаются при помощи двухсторонних гауссовых функций вида:

$$\mu_{A_i^j} = 1 / (1 + [(x - c_i^j) / a_i^j]^{2b_i^j}), \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2, \dots, r, \quad (15)$$

где a_i^j – коэффициент концентрации функции принадлежности; c_i^j – координата максимума; b_i^j – коэффициент крутизны функции. Во время обучения нечёткой нейронной сети (ННС) формируются команды на изменение значений переменных a_i^j , b_i^j и c_i^j . Изменённые значения переменных a_i^j , b_i^j и c_i^j являются частью УВ, используемых для адаптации нечёткого контроллера.

2. Формируется база знаний ННС аналогичная той, которая используется в нечётком контроллере, правила аналогичны соотношению (13); под УВ на систему нечёткого вывода понимается вектор вида:

$$M_s = \langle M_s^{in.1}, M_s^{in.2}, M_s^{out} \rangle, \quad (16)$$

где $M_s^{in.1}$ – вектор УВ на первую входную переменную W_{t_n} ; $M_s^{in.2}$ – вектор УВ на вторую входную переменную $W_{t_{n-1}}$; M_s^{out} – вектор УВ на область значений выходной переменной системы нечёткого вывода P_q . При этом

$$M_s^{in.1} = \langle F_a^{in.1}, F_b^{in.1}, F_c^{in.1} \rangle, \quad (17)$$

$$M_s^{in.2} = \langle F_a^{in.2}, F_b^{in.2}, F_c^{in.2} \rangle, \quad (18)$$

$$M_s^{out} = \langle F_{P_q} \rangle, \quad (19)$$

где $F_a^{in.1} = \{f_{a_i}^{in.1}\}$ и $F_a^{in.2} = \{f_{a_i}^{in.2}\}$, $F_b^{in.1} = \{f_{b_i}^{in.1}\}$, $F_b^{in.2} = \{f_{b_i}^{in.2}\}$, $F_c^{in.1} = \{f_{c_i}^{in.1}\}$ и $F_c^{in.2} = \{f_{c_i}^{in.2}\}$ – множества УВ на a_i^j , b_i^j и c_i^j каждой ФП первой и второй входной переменной; $F_{P_q} = \{f_{P_{qj}}\}$ – множество УВ на значения выходной переменной P_q .

3. Производится получение выходных значений с учётом начальных положений ФП входных переменных и имеющейся базы правил с использованием метода Сугено.

4. Производится определение погрешности обучения для каждого из прецедентов при помощи соотношения вида:

$$E_k = \frac{1}{2} [P_{q.out}^k - P_q^k]^2 = \frac{1}{2} [P_{q.out}^k (\{a_i^{in1}\}, \{b_i^{in1}\}, \{c_i^{in1}\}), \{a_i^{in2}\}, \{b_i^{in2}\}, \{c_i^{in2}\}, \{P_{qj}\}) - P_q^k]^2 \quad (20)$$

5. Определение множеств УВ для корректировки параметров ФП входных переменных и области определения выходной переменной с использованием соотношений вида:

для нахождения области определения выходной переменной $f_{P_{qj}}$:

$$f_{P_{qj}} = P_{qj}^{(it+1)} = P_{qj}^{it} - \eta \cdot \partial E_k / \partial P_{qj} = P_{qj}^{it} - \eta \cdot (P_{q.out}^k - P_q^k) \cdot \alpha_j / (\sum_{\pi=1}^{\pi_{\max}} \alpha_{\pi}), \quad (21)$$

где η – коэффициент обучения (в рамках исследований, по рекомендации экспертов $\eta = 0,2$); it – число корректировок для P_{qj} , $j \in [1, \pi_{\max}]$;

для нахождения параметров ФП первой входной переменной W_{t_n} :

$$f_{a_i}^{in.1} = a_i^{in1.it+1} = a_i^{in1.it} - \eta \cdot \partial E_k / \partial a_i^{in1}, \quad (22)$$

$$f_{b_i}^{in.1} = b_i^{in1.it+1} = b_i^{in1.it} - \eta \cdot \partial E_k / \partial b_i^{in1}, \quad (23)$$

$$f_{c_i}^{in.1} = c_i^{in1.it+1} = c_i^{in1.it} - \eta \cdot \partial E_k / \partial c_i^{in1}, \quad (24)$$

где $\partial E_k / \partial z_j$, $\partial E_k / \partial a_i^{in1}$, $\partial E_k / \partial b_i^{in1}$, $\partial E_k / \partial c_i^{in1}$ – градиенты функции изменения погрешности относительно определенного параметра ФП или области значения выходной переменной.

Для нахождения параметров ФП второй входной переменной $W_{t_{n-1}}$ используются соотношения, которые имеют вид, аналогичный (22)–(24). Градиенты погрешности коэффициента концентрации ФП a_i^j переменной W_{t_n} :

$$\frac{\partial E_k}{\partial a_i^{in1}} = (P_{q.out}^k - P_q^k) \frac{\partial}{\partial a_i^{in1}} (P_{q.out}^k ([\{a_i^{in1}\}, \{b_i^{in1}\}, \{c_i^{in1}\}], [\{a_i^{in2}\}, \{b_i^{in2}\}, \{c_i^{in2}\}], \{P_{q_j}\})), \quad (25)$$

градиент погрешности коэффициента крутизны ФП b_i^j переменной W_{t_n} :

$$\frac{\partial E_k}{\partial b_i^{in1}} = (P_{q.out}^k - P_q^k) \frac{\partial}{\partial b_i^{in1}} (P_{q.out}^k ([\{a_i^{in1}\}, \{b_i^{in1}\}, \{c_i^{in1}\}], [\{a_i^{in2}\}, \{b_i^{in2}\}, \{c_i^{in2}\}], \{P_{q_j}\})), \quad (26)$$

градиент погрешности координаты максимума ФП c_i^j переменной W_{t_n} :

$$\frac{\partial E_k}{\partial c_i^{in1}} = (P_{q.out}^k - P_q^k) \frac{\partial}{\partial c_i^{in1}} (P_{q.out}^k ([\{a_i^{in1}\}, \{b_i^{in1}\}, \{c_i^{in1}\}], [\{a_i^{in2}\}, \{b_i^{in2}\}, \{c_i^{in2}\}], \{P_{q_j}\})), \quad (27)$$

для нахождения градиенты погрешности параметров ФП второй входной переменной $W_{t_{n-1}}$ соотношения имеют вид, аналогичный (25)–(27).

6. Вычисление погрешности E между результатом ННС и обучающим прецедентом:

$$E = \sum_{k=1}^{\xi} E_k, \quad (28)$$

где E_k – погрешность для каждого обучающего прецедента; ξ – общее количество прецедентов используемых для обучения.

7. Если $E \leq E_{don}$, процесс обучения завершается, а если $E > E_{don}$, то выполняется проверка условия не превышения количества итераций n_{um} .

8. Если $n_{um} < n_{um}^{\max}$, то $n_{um_i} = n_{um_{i-1}} + 1$ и продолжается процесс обучения, а если $n_{um} \geq n_{um}^{\max}$, производится переход к следующей операции.

9. Корректировка ННС при помощи изменения количества нейронов в скрытых слоях, а в случае необходимости меняются алгоритмы обучения.

Схема реализации метода адаптации для нечёткой СУ трафиком информационных пакетов, основанной на использовании ННС, приведена на рисунке 4.

Результаты работы предложенного метода на примере контроллера, работающего по принципам REM, приведены на рисунках 5 и 6:

Для повышения точности обучения ННС предложен алгоритм обучения, основанный на использовании коэффициента инерции изменения погрешности обучения (КИИПО), величина которого зависит от мощности термно-

жеств, описывающих входные переменные. Последовательность операций алгоритма следующая.

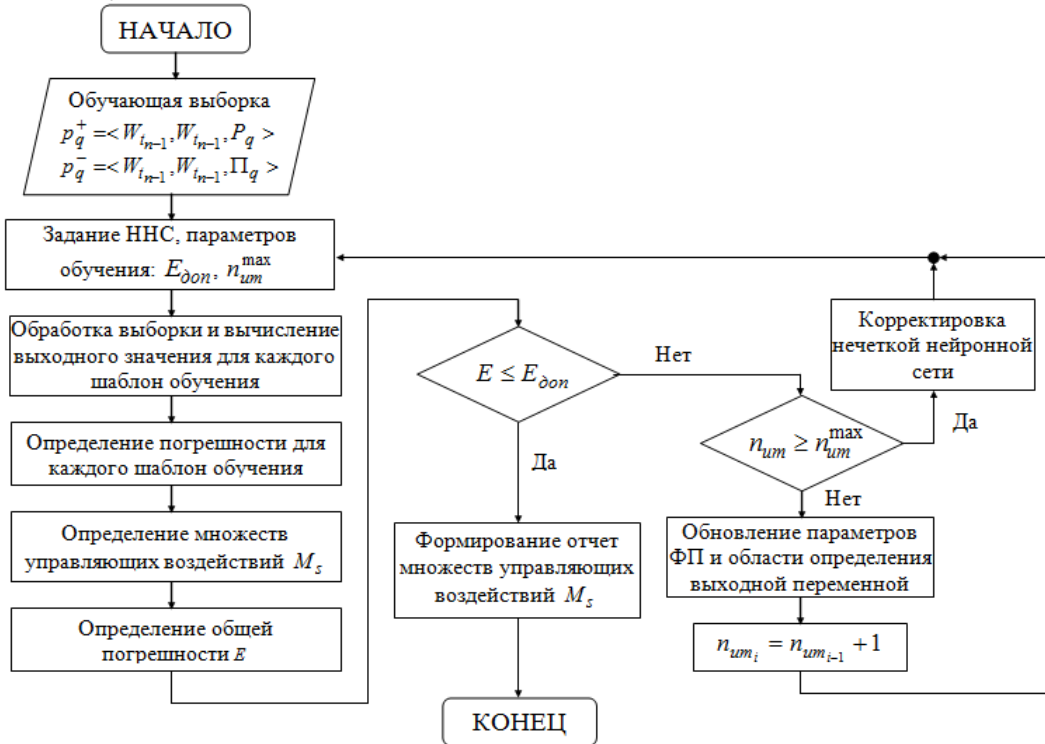


Рисунок 4 – Метод адаптации нечёткой системы управления трафиком информационно-коммуникационных пакетов, основанной на использовании ННС

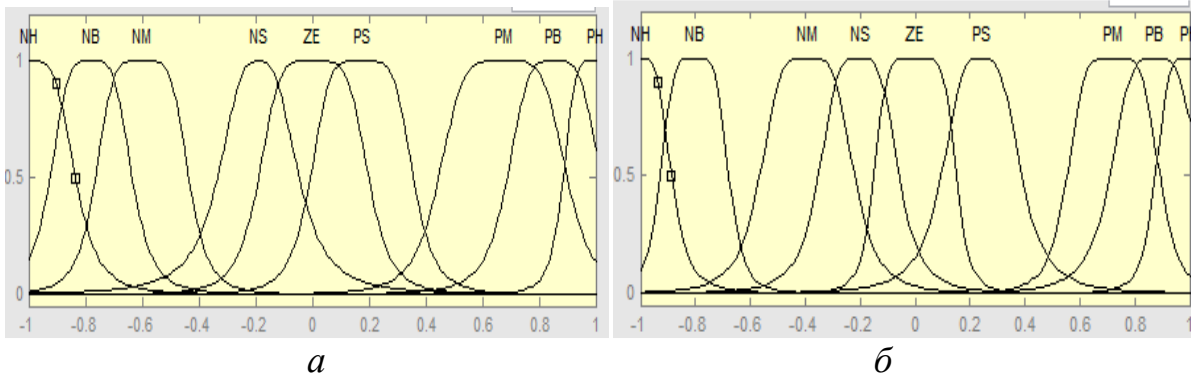


Рисунок 5 – ФП переменных Pr_{t_n} (a) и $Pr_{t_{n-1}}$ (б) после адаптации

1. Задание параметров обучения: допустимая погрешность E_{don} , максимальное количество итерации $n_{ит}^{max}$, количество входных переменных $n_{пер}^{вх.}$, мощность термножества (количество термов) каждого входного переменного $n_{терм}^{вх.пер.}$, с указанием типа ФП, количество выходных переменных $n_{пер}^{вых.}$.

2. Определение коэффициента, получение которого в общем виде можно представить в виде зависимости:

$$\alpha_{обуч.}^{общ.} = F_{обуч.}^{общ.}(n_{пер.}^{вх.}, n_{терм}^{вх.пер.}, n_{пер.}^{вых.}), \quad (29)$$

где $F_{обуч.}^{общ.}$ – оператор для обработки входных переменных, в рамках проводимых исследований, учитывая соотношения (16)–(19) величины $n_{пер.}^{вх.} = 2$, а

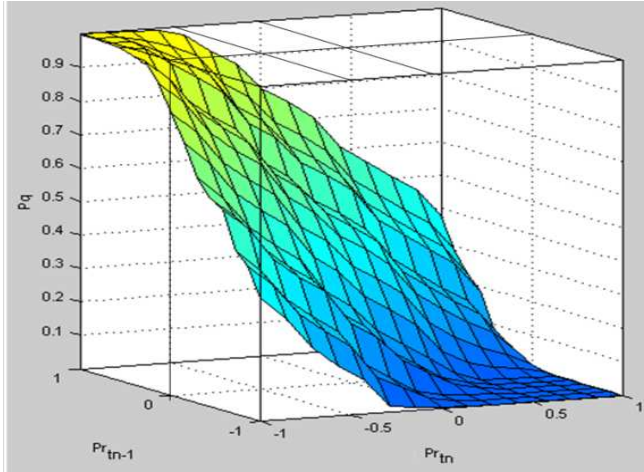


Рисунок 6 – Вид значений выходной переменной P_q после адаптации

$n_{терм}^{вх.пер.} = 1$ и их количество не изменяется в течение эксплуатации системы адаптации. Поэтому для ННС, у которой $n_{пер.}^{вх.} = 2$, а $n_{терм}^{вх.пер.} = 1$, соотношение (29) можно преобразовать к виду:

$$\alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1} = F_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1}(n_{терм}^{вх.пер.}), \quad (30)$$

учитывая, что количество термов входных переменных в общем случае может быть различным, нахождение значения $\alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1}$ производится при помощи выбора значения

из кортежа возможных значений коэффициента инерции $\alpha_{возм.}^{2 \rightarrow 1} = \langle 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,98 \rangle$. Условия для принятия решения о выборе определённого значения коэффициента инерции имеют вид:

$$E \leq E_{доп.}, n_{ит.} \rightarrow \min, \quad (31)$$

где $E_{доп.}$ – допустимый уровень погрешности. В таблице 1 показаны результаты моделирования по получению целесообразного значения $\alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1}$ из кортежа $\alpha_{возм.}^{2 \rightarrow 1}$ для определённого значения $n_{терм}^{вх.пер.}$, при условии, что использованы двухсторонние гауссовы ФП и выполнения (31).

Таблица 1 – Значение коэффициента инерции в зависимости от количества термов о входной переменной

Наименование параметра	Значение параметра							
$n_{терм}^{вх.пер.}$	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1}$	0,9	0,98	0,9	0,98	0,9	0,9	0,9	0,9
$n_{ит.}$	105	64	35	75	37	39	40	25

3. Обработка выборки и вычисление выходного значения для выполнения итерационного процесса для обучения сети для k -го шаблона, в отличие от метода градиентного спуска заключается в учёте КИ. Соотношения для формирования УВ $f_{P_{q_j}}$, которые используются для корректировки области определения выходной переменной:

$$f_{P_{q_j}} = P_{q_j}^{(it+1)} = P_{q_j}^{it} + [\alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1} \cdot \Delta P_{q_j}^{it-1} - (1 - \alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1}) \cdot \eta \cdot \partial E_k / \partial P_{q_j}], \quad (32)$$

для формирования УВ $f_{a_i}^{in.1}$, используемых для корректировки коэффициентов концентрации ФП входной переменной W_{t_n} :

$$f_{a_i}^{in.1} = a_i^{in.1.it+1} = a_i^{in.1.it} + [\alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1} \cdot \Delta a_i^{in.1.it-1} - (1 - \alpha_{обуч.}^{общ.2 \rightarrow 1}) \cdot \eta \cdot \partial E_k / \partial a_i^{in.1}], \quad (33)$$

для формирования УВ $f_{b_i}^{in.1}$, используемых для корректировки коэффициентов крутизны ФП входной переменной W_{t_n}

$$f_{b_i}^{in.1} = b_i^{in.1.it+1} = b_i^{in.1.it} + [\alpha_{обуч}^{обуч2 \rightarrow 1} \cdot \Delta b_i^{in.1.it-1} - (1 - \alpha_{обуч}^{обуч2 \rightarrow 1}) \cdot \eta \cdot \partial E_k / \partial b_i^{in.1}], \quad (34)$$

для нахождения УВ $f_{c_i}^{in.1}$, которые используются для корректировки координаты максимума ФП входной переменной W_{t_n} :

$$f_{c_i}^{in.1} = c_i^{in.1.it+1} = c_i^{in.1.it} + [\alpha_{обуч}^{обуч2 \rightarrow 1} \cdot \Delta c_i^{in.1.it-1} - (1 - \alpha_{обуч}^{обуч2 \rightarrow 1}) \cdot \eta \cdot \partial E_k / \partial c_i^{in.1}], \quad (35)$$

Соотношения для формирования УВ для корректировки ФП переменной $W_{t_{n-1}}$ с использованием КИ имеют вид, аналогичный (33)–(35).

4. Вычисление погрешности E между результатом ННС и обучающим шаблоном:

$$E = \sum_{k=1}^{\xi} E_k, \quad (36)$$

где E_k – погрешность для каждого обучающего прецедента.

5. Проверка условия, что если $E \leq E_{don}$, то принимается, что точность работы ННС удовлетворительна и процесс обучения следует завершить, а если $E > E_{don}$, то проверка условия итерации n_{um} .

6. Если $n_{um} < n_{um}^{max}$, то $n_{um_i} = n_{um_{i-1}} + 1$ и продолжается процесс обучения, а если $n_{um} \geq n_{um}^{max}$, то производится переход к следующей операции.

7. Корректировка ННС усилиями экспертной группы при помощи изменения количества нейронов или изменения алгоритмов обучения.

Схема алгоритма обучения ННС приведена на рисунке 7.

По результатам вычислительного эксперимента алгоритм с КИИПО для обучения ННС превосходит метод, основанный на градиентном спуске по показателю точности, в среднем на 40 % при заданном числе итераций.

В четвёртой главе проводится исследование эффективности использования предложенных теоретических положений по повышению эффективности управления трафиком информационных пакетов в СПД.

Для проведения исследования топология сети состояла из множества узлов-источников трафика N_{Source} . Трафиковая нагрузка, создаваемая узлами, поступала на маршрутизатор R_{Source} , который направлял поток трафика на маршрутизатор R_{Sink} . R_{Sink} направлял поток трафика множеству узлов N_{Sink} . Для моделирования использовалась программа NS2. Исходные данные для экспериментов: размер пакета – 1 000 байт, размер буфера – 500 пакетов, тип протокола – TCP/New Reno, период проведения измерений загрузки буфера $\Delta t_n = 0,006$ секунд, время моделирования – 100 секунд.

Эффективность управления трафиком информационных пакетов оценивалась по критериям вероятность потери пакета P_{lost}^{pack} – условие (1), при соответствии принятым ограничениям условия (2)–(4), к которым относятся

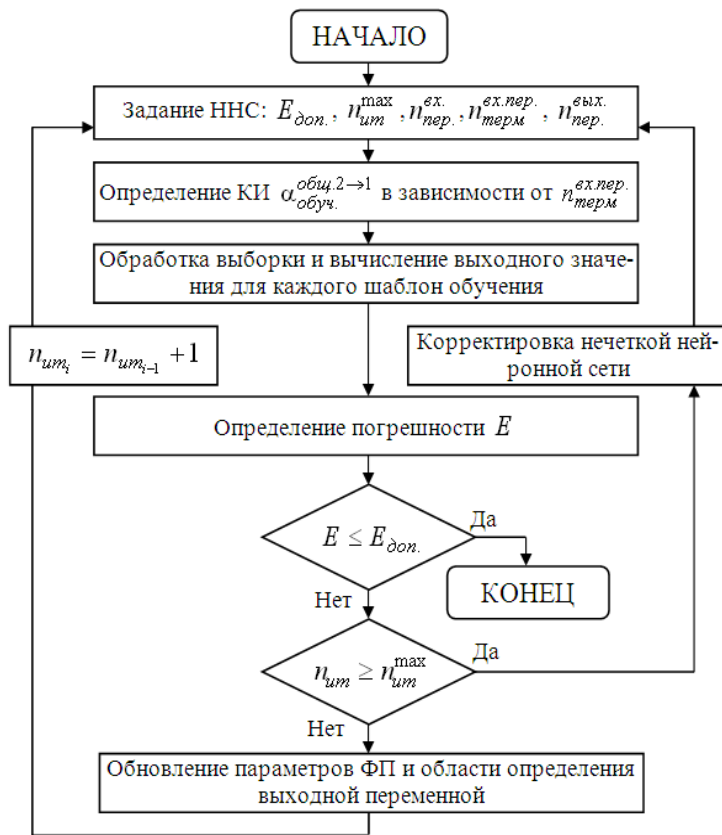


Рисунок 7 – Алгоритм с КИИПО для обучения ННС

время стабилизации величины очереди при резком изменении интенсивности поступающего трафика $T_{stab.que}^{pack}$, доля использования линии передачи (ЛП) L_{line}^{pack} , время пребывания пакета в очереди $T_{p.in.q}^{нов.}$. В экспериментах исследованы методики управления трафиком, реализованные на основе полученных теоретических положений AFRED и AFREM. Для сравнения выбраны методики RED, REM, FEM и FUZREM. Результаты эксперимента обобщены на графиках, показанных на рисунках 8–10.

С учётом анализа рисунков 8–10, повышение эффективности по критерию P_{lost}^{pack} в среднем составило

63 %, что соответствует условию (1), подтверждается выполнение условий (2)–(4). В частности, время стабилизации длины очереди в среднем сократилось на 60,2 %, а коэффициент загрузки линии возрос в среднем на 6,2 %. Также среднее время нахождения пакета в буфере устройства для методик AFREM и AFRED составило в пределах 1,588 – 1,594 мс, тогда как у методик разработанных ранее оно находилось в пределах от 1,605 – 1,609 мс.

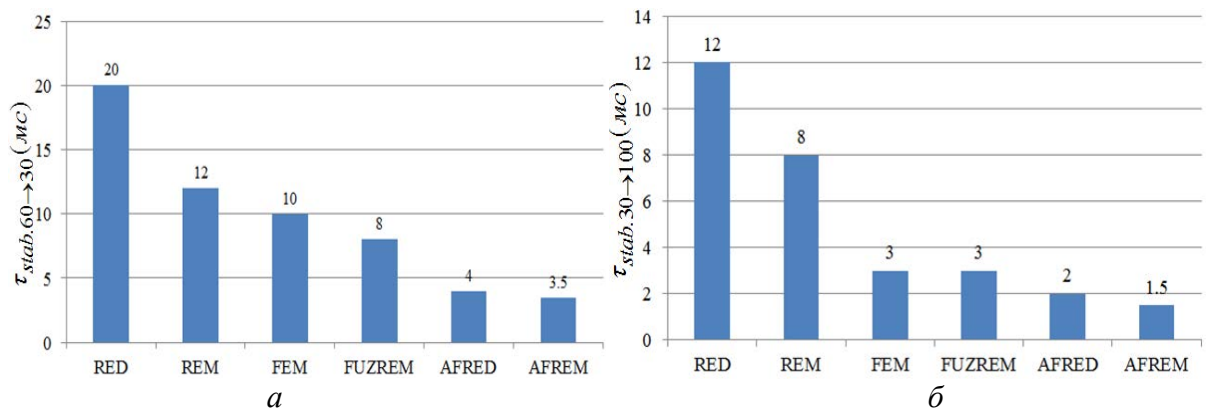


Рисунок 8 – Время стабилизации очереди при уменьшении потоков трафика от 60 до 30 (а) и при увеличении потоков трафика от 30 до 100 (б)

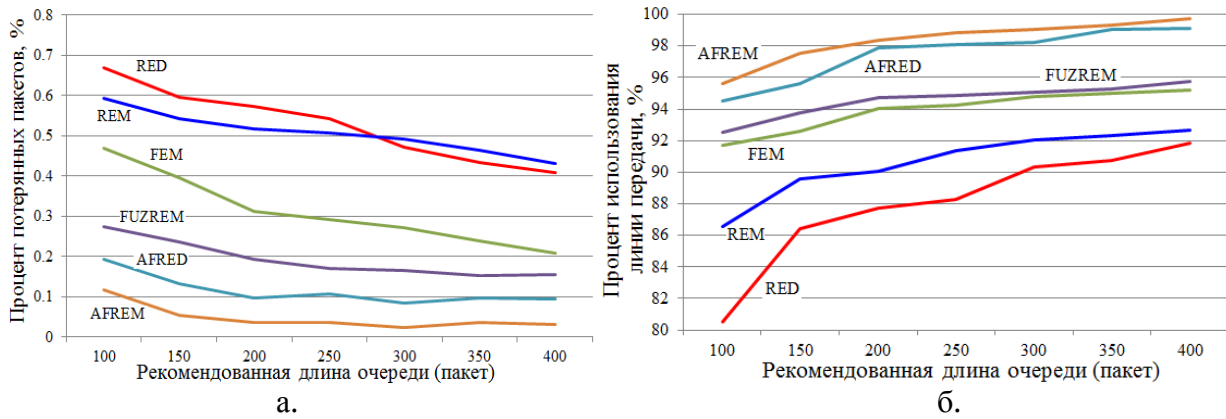


Рисунок 9 – Вероятность потери пакетов (а), % использования ЛП (б) в зависимости от величины рекомендованной очереди

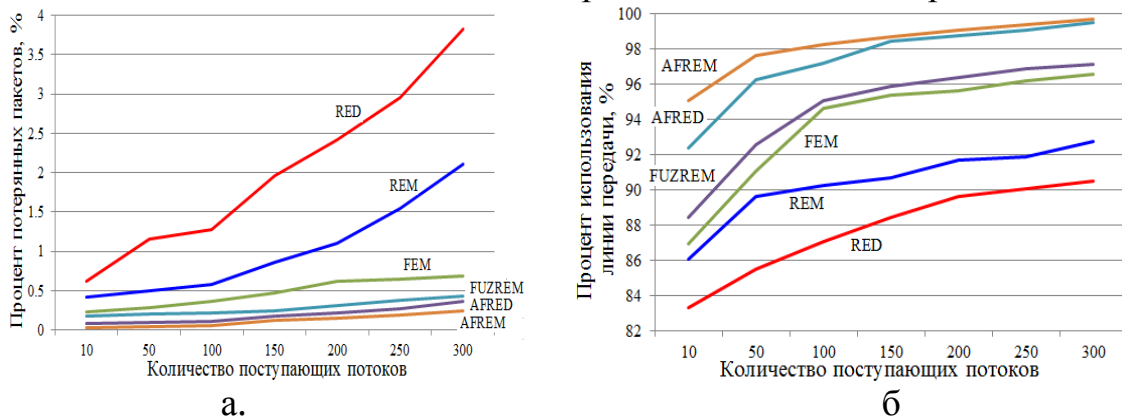


Рисунок 10 – Вероятность потери пакетов (а), % использования ЛП (б) в зависимости от количества поступающих потоков

Таким образом, предложенные теоретические положения повышают эффективность управления трафиком информационных пакетов в СПД.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. В результате анализа показана тенденция увеличения объёмов передаваемого трафика; в результате этого увеличивается нагрузка на оборудование СПД, что приводит к потерям информационных пакетов; для сокращения потерь применяются различные методики управления трафиком информационных пакетов в числе и методики, основанные на контроле заполнения буферов оборудования информационными пакетами; использование методик ограничивается относительно высоким уровнем потерь трафика; для дальнейшего повышения эффективности формализована задача разработки теоретических методов для управления трафиком информационных пакетов в сети передачи данных.

2. Разработана методика повышения эффективности управления трафиком информационных пакетов в сети передачи данных; методика позволяет сократить потери информационных пакетов за счёт более полного учёта специфики трафика; методика заключается в создании нечёткого контроллера, который идентифицирует перегрузку, на основании её идентификации формируется управляющее воздействие, которое регулирует интенсивность передачи трафика узлом-источником; параллельно ведётся статистика достижения целей

управления, в случае превышения ошибочных решений критического значения модуль адаптации корректирует сам контроллер.

3. Предложен метод адаптации нечеткой системы управления трафиком информационных пакетов в сети передачи данных на основе мониторинга загрузки буферов сетевых устройств, основанный на формировании корректирующих воздействий для функций принадлежности входных переменных и области значения выходной переменной, используемой в контроллере.

4. Построен алгоритм обучения нечёткой нейронной сети, отличающийся использованием коэффициента инерции изменения погрешности обучения, величина которого зависит от мощности терммножеств, описывающих входные переменные, позволяющий повысить точность вычислений сети за определённое количество итераций обучения, по результатам вычислительного эксперимента предложенный алгоритм в условиях работы системы адаптации превзошёл метод, основанный на градиентном спуске по показателю точности, в среднем на 40 % при заданном числе итераций.

5. Проведённые эксперименты показали повышение эффективности управления трафиком информационных пакетов по критериям: вероятность потери пакетов в среднем составила в среднем 63 %, время стабилизации длины очереди при резком изменении интенсивности нагрузки в среднем на 60,2 %, эффективность использования пропускной способности канала в среднем на 6,2 %, условие не превышения задержки пакета в буфере устройства выполнено. Результаты выполненных исследований повышают эффективность работы сети передачи данных за счёт разработки системы управления интенсивностью передачи трафика.

Перспективы дальнейшего использования результатов заключаются в разработке протоколов управления работой сетей передачи данных, по которым передаётся разнородный трафик, в том числе и мультимедиа приложений. Результаты можно использовать в других системах массового обслуживания для повышения эффективности управления очередями.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, включенных в список ВАК РФ

1. **Чан Куок Тоан**, Нечеткая система управления интенсивностью передачи трафика в сетях передачи данных / **Чан Куок Тоан**, А.А. Сорокин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – № 5 (215). – С. 94-101.
2. Сорокин, А.А. Оценка результатов использования протокола RIP в системах связи с динамической топологией сети методом имитационного моделирования /А.А. Сорокин, В.Н. Дмитриев, П.С. Резников, **Чан Куок Тоан** // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, Вычислительная техника и Информатика – 2014. №4. – С. 85-93.
3. Дмитриев, В.Н. Повышение эффективности управления трафиком в гетерогенных системах передачи данных в условиях неопределенности. /В.Н. Дмитриев, А.А. Сорокин, **Чан Куок Тоан**, Фам Хак Чонг// Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, Вычислительная техника и Информатика – 2015. №1. – С. 67-77.
4. Дмитриев, В.Н. Разработка программного модуля для исследования систем

связи с динамической топологией сети в среде имитационного моделирования Network Simulator./В.Н.Дмитриев, А.А.Сорокин, П.С.Резников, **Чан Куок Тоан** // Инфокоммуникационные технологии – 2015. Том 1. №1 – С. 33-39.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах научного цитирования (SCOPUS, Web o f Science, IEEE Xplore)

5. Dmitriev, V.N. Studying methods of data traffic management in wireless networks in the terms of uncertainty / V.N. Dmitriev, A.A. Sorokin, **Tran Quoc Toan**, Pham Khac Trong // Application of Information and Communication Technologies, AICT 2015. – Rostov on Don, Russia, IEEE 2015. – pp. 01-04. DOI: 10.1109/ICAICT.2015.7338603.

6. **Tran Quoc Toan**, Fuzzy system for controlling queue size of packets in telecommunication nodes / Tran Quoc Toan, Sorokin A.A., Vo Thi Huyen Trang // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). 2018. pp.: 1 – 6. DOI: 10.1109 / MWENT .2018. 8337252.

Статьи в межвузовских научных сборниках, сборниках трудов международных, всероссийских конференций

7. Сорокин, А.А. Разработка математической модели для программы по изучению систем связи с динамической топологией сети /А.А. Сорокин, П.С. Резников, **Чан Куок Тоан**, М.Е. Серкалиева // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т.10. / под общ. ред. А.А. Большакова. – Нижний Новгород, гос. тех. ун-т, 2013. – С. 57-60.

8. Дмитриев, В.Н. Разработка интеллектуальной модели для определения метрики мобильного узла в беспроводной сети. / В.Н.Дмитриев, А.А.Сорокин, **Чан Куок Тоан**, Фам Хак Чонг // Международная конференция научно-педагогических работников Астраханского государственного технического университета (60-ая НПП). – Астрахань: Изд. АГТУ. –2016.

9. **Tran Quoc Toan** Improved mechanisms active queue management based on adaptive fuzzy control /**Tran Quoc Toan**, Vo Thi Huyen Trang // Информационные технологии коммуникаций: современные достижения. Сборник материалов I Молодежной междунаро. конференции. – Астрахань: Издатель: Сорокин Роман Васильевич. 2017, С. 91-92

10. Буй Минь Дык Проектирование программного обеспечения для моделирования сетей передачи данных / Буй Минь Дык, **Чан Куок Тоан**, Во Тхи Хуен Чанг //Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО – 2016.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613226 от 06.03.2018г. МПК (нет) «Система моделирования адаптивным процессом нечеткого управления очередями информационных пакетов в телекоммуникационных сетях» / А.А. Сорокин, **Чан Куок Тоан**, Во Тхи Хуенг Чанг. АГТУ. – 2018.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615658 от 14.05.2018г. МПК (нет) «Система нечеткого управления очередью в сетевых узлах» / А.А. Сорокин, **Чан Куок Тоан**, Во Тхи Хуенг Чанг. АГТУ. – 2018.