УДК 681.142.33, 681.14

С.А. Агеев, Н.А. Агеева, В.В. Каретников, А.А. Привалов

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА УСЛУГ В КОРПОРАТИВНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Агеев Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. Начальник научно-исследовательского отдела АО «Радиоавионика», г. Санкт-Петербург. Специализируется в области проектирования телекоммуникационных систем, автоматизированных систем управления связью, а также в области разработки методов и алгоритмов управления сложными системами. Имеет статьи и патенты в области создания телекоммуникационных и мультисервисных систем и сетей связи. [e-mail: serg123_61@mail.ru].

Агеева Нина Сергеевна, окончила инженерно-физический факультет Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики («Университет ИТМО»). Научный сотрудник Военной академии связи (ВАС) им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург. Специализируется в области построения автоматизированных систем управления качеством услуг в мультисервисных сетях связи. Имеет статьи и патенты в области методов и алгоритмов сжатия данных в мультисервисных сетях связи. [e-mail: nine11ia@yandex.ru].

Каретников Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, окончил Санкт-Петербургский Государственный университет водных коммуникаций. Заведующий кафедрой «Судоходство на внутренних водных путях» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург. Специализируется в области проектирования и создания систем, сетей связи и систем радионавигации. Имеет статьи и патенты в данной предметной области. [e-mail: spguwc-karetnicov@yandex.ru].

Привалов Андрей Андреевич, доктор военных наук, окончил ВАС им. С.М. Буденного. Профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург. Специализируется в области математического моделирования и разработки методов, алгоритмов и систем управления инфокоммуникационными системами. Имеет статьи и патенты в области оперативного управления сетями связи и большими киберфизическими системами. [apivalov@inbox.ru].

Аннотация

В работе предложены интеллектуальные метод и алгоритмы оперативного оценивания состояния сетевых элементов для обеспечения показателей качества услуг связи в корпоративных мультисервисных сетях связи, которые функционируют в режиме, близком к реальному времени.

Особенностью корпоративных мультисервисных сетей является высокая динамика изменения их состояния. Задачей же автоматизированной системы управления сетью является обеспечение заданного качества услуг связи.

Таким образом, актуальность данного исследования определяется необходимостью реализации процессов управления сетью в режиме, близком к реальному времени, с заданным качеством.

Основой метода оперативного оценивания состояния сетевых элементов является концепция применения интеллектуальных агентов. В предлагаемом подходе интеллектуальные агенты создаются как иерархические нечеткие си-

туационные сети, в которых решения по управлению, в отличие от известных методов, основанных на применении эталонных ситуаций, вырабатываются на основе решения иерархической системы оптимизационных задач на основе методов нечеткого математического программирования. Главной парадигмой их функционирования является «ситуация - действие». Это позволяет существенно снизить размерность решаемой задачи и получать Парето-оптимальные решения по управлению качеством услуг связи. Интеллектуальный агент управленческие решения может реализовывать в автоматическом режиме, при условии, что администратор сети такие возможности ему делегирует.

Метод оценки параметров трафика базируется на концепции условной нелинейной Парето-оптимальной фильтрации В.С. Пугачева. Его суть заключается в применении двухэтапной процедуры; на первом этапе производится прогноз значений оценок параметров, а на втором, с получением следующих наблюдений – корректировка их значений. Адаптация реализуется на основе псевдоградиентных процедур, параметры которых регулируются с помощью нечеткого логического вывода Такаги-Сугено. Средняя относительная погрешность оценки параметров трафика не превышает 10%, что достаточно для оперативного управления качеством услуг связи.

Ключевые слова: иерархическая нечеткая ситуационная сеть, интеллектуальный агент, псевдоградиентный алгоритм, условно нелинейная Парето-оптимальная фильтрация, нечеткий логический вывод Такаги-Сугено, нечеткая база правил, нечеткая база знаний.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-25-35

THE REAL-TIME ASSESSING METHOD FOR THE STATE OF NETWORK ELEMENTS TO PROVIDE FOR QUALITY PARAMETERS IN CORPORATE HIGH-SPEED MULTISERVICE COMMUNICATION NETWORKS

Sergei Aleksandrovich Ageev, Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk Polytechnic Institute; Head of a research department at Radioavionica JSC in St. Petersburg; specializes in the design of telecommunication systems, automated communication management systems, and the development of methods and algorithms for managing complex systems; an author of articles and patents in the field of telecommunication and multiservice systems and communication networks. e-mail: serg123_61@mail.ru.

Nina Sergeevna Ageeva, graduated from the Faculty of Engineering and Physics of the Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics, and Optics (ITMO University); Scientific Associate the Marshal Budjonny Military Academy of Signal Corps; specializes in building the automated service quality management systems in multiservice communication networks; an author of articles and patents in the field of data compression methods and algorithms in multiservice communication networks. e-mail: nine11ia@yandex.ru.

Vladimir Vladimirovich Karetnikov, Doctor of Sciences in Engineering, Professor; graduated from the Saint Petersburg State University of Waterway Communications; Head of the Department of Inland Navigation at Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; specializes in the design and development of systems, communication networks and radio navigation systems; an author of articles and patents in this subject area. e-mail: spguwc-karetnicov@yandex.ru.

Andrei Andreevich Privalov, Doctor of Military Sciences; graduated from the Marshal Budjonny Military Academy of Signal Corps; Professor of the Department of Electrical Communication of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; specializes in the field of mathematical modeling and development of methods, algorithms, and control systems of infocommunication systems; an author of articles and patents in the field of operational management of communication networks and large cyber-physical systems. e-mail: aprivalov@inbox.ru.

Abstract

The article suggests an intelligent method and algorithms of assessing the state of network elements to provide for quality parameters of communication services in corporate multi-service communication networks, which operate in near real-time mode.

The distinctive feature of corporate multi-service networks is the rapid change of their state. And this is an automated network management system, which provides for the specified quality of communication services.

In this way, the relevance of this research is highlighted by the need to implement network management processes with specified quality in near real-time mode.

The real-time assessing method for network element state is based on the intelligent agent concept. The suggested approach assumes the intelligent agents are created as hierarchical situational fuzzy networks, where management

solutions are made on the basis of solution of hierarchical system of optimization problems, which relies on the methods of fuzzy mathematical programming, unlike common case-based methods. The main paradigm of their operation lies in 'situation – action.' This allows to reduce significantly the dimension of solving task and to obtain Pareto-optimal solutions for quality management of communication services. The intelligent agent is able to implement management solutions automatically provided that the network manager designate such capabilities to it.

The method of estimating traffic parameters is based on the concept of conventional nonlinear Pareto-optimal filtering developed by V.S. Pugachev. The core of this method is in the two-stage procedure. In the first stage the parameter estimations are predicted, and in the second one their values are corrected, after next observations have been received. Adaptation is implemented on the basis of pseudogradient procedures, which parameters are adjusted with Takagi-Sugeno fuzzy logical conclusion. The mean relative error of traffic parameters estimation does not exceed 10%, which is sufficient for real-time quality management of communication services.

Key words: hierarchical situational fuzzy network, intelligent agent, pseudogradient procedures, conventional nonlinear Pareto-optimal filtering, Takagi-Sugeno fuzzy logical conclusion, fuzzy rule base, fuzzy knowledge base.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие промышленности, бизнеса, а также транспортных и логистических систем характеризуется успешным применением корпоративных мультисервисных сетей связи (KMCC), которые обеспечивают пользователям предоставление различных инфокоммуникационных услуг. Как правило, на больших предприятиях KMCC состоят из локальных вычислительных сетей (LAN) и из объединяющих их глобальных телекоммуникационных сетей (WAN). Таким образом, техническая платформа KMCC представляет собой логически структурированную совокупность скоростных каналов связи, маршрутизаторов (узлов коммутации пакетов), серверов услуг и сервисов связи, предоставляемых пользователям KMCC, а также иерархическую автоматизированную систему управления связью (АСУС). Функциональной основой KMCC являются технологии телекоммуникаций и сетей нового поколения (NGN), ядром которых являются пакетные сети на основе стека протоколов TCP/IP/MPLS, интегрирующие различные услуги связи [1].

Известно, что в KMCC трафик различных приложений является весьма разнообразным [2, 3]. Он имеет сложную статистическую структуру. Его параметры, как правило, являются значениями нестационарных нелинейных случайных процессов, при этом заданные требования к качеству сервисов и предоставляемых услуг связи (Quality of Service – QoS) должны выполняться полностью.

Для дополнения функциональных возможностей стека протоколов TCP/IP/MPLS в части обеспечения качества услуг связи (QoS) при передаче разнородного сетевого трафика разработаны и применяются две взаимодополняющих друг друга модели управления трафиком – модель интегрированных (Integrated Service) и модель дифференцированных (Differentiated Service) услуг [4]. Кроме этого, в пакетных сетях используются протоколы RSVP (Resource Reservation Protocol), RTP (Real – time Transport Protocol), которые позволяют управлять межконцевыми задержками при передаче пакетов [5, 6].

Однако существуют объективные трудности в построении и реализации методов и алгоритмов опе-

ративного оценивания параметров и характеристик, определяющих качество услуг связи в KMCC. Они обусловлены сложностью и большим пространственным размахом сетевой инфраструктуры KMCC, ее разнородностью, необходимостью быстрого и качественного анализа большого количества различных динамично изменяющихся сетевых и информационных параметров и характеристик для принятия управленческих решений, которые, в свою очередь, обладают неточностью, неопределенностью и нечеткостью. Отмеченные особенности функционирования KMCC и процесса ее управления определяют необходимость разработки и применения для оперативной выработки и реализации управленческих решений по управлению качеством услуг связи KMCC интеллектуальных методов. Этим определяется необходимость разработки подобных методов, которая представляет собой актуальную научную проблему.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сетевые характеристики, наиболее существенно влияющие на качество обслуживания, определяются рекомендациями ITU – Т Y.1540 и Y.1541 [7, 8]. К ним относятся:

- надежности сети / сетевых элементов;
- вероятность потери передаваемых пакетов;
- пропускная способность сети / канала связи, которая измеряется в битах в секунду;
- задержка передачи пакетов;
- вариация задержки передачи пакетов.

Параметры, связанные с требуемой пропускной способностью для различных приложений, могут быть определены в соответствии с рекомендациями ITU – Т Y.1221 [9].

К основным механизмам обеспечения QoS в KMCC, так же, как и в сетях NGN, можно отнести [10]:

1. Механизмы в плоскости управления, включающие:
 - управление доступом при соединении;
 - QoS-маршрутизацию;
 - резервирование ресурсов, основанное на применении протокола RSVP.
2. Механизмы в плоскости данных, которые включают:

- управление буферами узлов коммутации (например, управление буферами маршрутизаторов);
- предотвращение и управление перегрузками трафика;
- механизмы маркировки пакетов;
- организацию и планирование очередей;
- классификацию трафика;
- управление характеристиками трафика.

3. Механизмы в плоскости менеджмента, состоящие из методов и процедур:

- сетевых измерений;
- обеспечения выполнения соглашений об уровне качества обслуживания SLA (Service Level Agreement).

Механизмы управления QoS в КМСС должны реализовываться с помощью АСУС. АСУС сетей класса NGN разрабатывается и создается на основе концепции модели иерархического сетевого управления TMN (Telecommunication Management Network) [11]. АСУС КМСС уровней управления услугами (УУ), сетью (УС), технологического управления (ТУ) и управления сетевыми элементами (СЭ) должна управлять QoS в режиме, близком к режиму реального времени. Это объясняется тем, что эти уровни управления должны обеспечивать эффективное сетевое управление, включая управление QoS, когда изменяются потребности пользователей в предоставляемых услугах связи, либо когда изменяется состояние КМСС, ввиду различных деструктивных внешних воздействий. К таким воздействиям можно отнести угрозы сетевой и компьютерной безопасности или внутренние технические сетевые отказы различных программно-аппаратных средств, СЭ, серверов предоставления услуг связи и так далее.

Особенности решаемых АСУС задач по управлению QoS делают крайне затруднительным применение подходов к управлению КМСС, основанных на построении моделей объекта управления, а также на использовании известных статистических методов, так как КМСС представляет собой большую, распределенную и сложную систему. Ее характерными особенностями являются большой пространственный размах, высокая динамика изменения состояния, стохастичность, многомерность и нелинейность протекающих в ней процессов [3, 4].

Наиболее перспективным подходом к синтезу АСУС КМСС является подход, основанный на использовании концепции распределенных интеллектуальных агентов (ИА) и применении для их создания нечетких методов и моделей, которые реализуют принцип «ситуация – действие» [12, 13]. Основными достоинствами подобного подхода являются ориентированность на анализ и моделирование процессов, которые представимы в виде логико-временных последовательностей, в виде пространственной взаимосвязанной распределенной системы объектов управления, а также в виде взаимоувязанной совокупности протекающих в них процессов. К основным алгоритмам и моделям данного класса можно отнести нечеткие автоматы, нечеткие иерархические сети, нечеткие сети Петри, нечеткие ситуационные сети, нечеткие когнитивные карты, нечеткие семантические сети [13].

В работах [12, 13] обосновывается перспективность синтеза автоматизированных систем управления в сложных системах организационно-технического типа на основе ситуационного подхода. В данном случае принципом построения АСУС на основе ситуационного подхода является не построение и анализ модели КМСС как объекта управления, а анализ и регулирование модели процесса управления КМСС.

Отметим основные методы, реализующие концепцию ситуационного управления [13]:

- методы, основанные на формировании подробного списка описания возможных (эталонных) ситуаций. Для больших сложных систем это бывает не совсем оправдано из-за своей сложности и громоздкости. Иногда этот подход не может быть реализован в принципе из-за возможного экспоненциального роста числа эталонных ситуаций;

- наиболее перспективными в плане реализации являются подходы, основанные на объединении принципов ситуационного управления и методов нечеткой логики и нечеткого вывода, которые получили название методов нечеткого ситуационного подхода.

Особенность автоматизированных систем управления, предназначенных для обеспечения процесса управления сложными организационно-техническими системами, заключается в том, что они должны не просто идентифицировать текущую ситуацию, но и определять рациональные режимы функционирования управляемых систем.

Таким образом, задача представленного исследования заключается в разработке метода распределенного иерархического нечеткого ситуационной сети для оценки параметров состояния СЭ в КМСС с целью обеспечения заданного качества предоставляемых услуг связи, на основе концепции создания и применения ИА.

2 МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЭ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ НЕЧЕТКИХ СИТУАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Предлагаемая функциональная структура ИА для управления качеством услуг связи приведена на рисунке 1. На этом же рисунке представлена схема взаимодействия ИА с СЭ.

ИА состоит из модуля оценки ситуации состояния СЭ, модуля решения информационно-расчетных задач и модуля принятия решений. Если администратор сети (лицо, принимающее решение, ЛПР) делегирует ИА возможность реализации принятого решения через автоматизированную систему СЭ, то управление будет реализовываться в автоматическом режиме (рис. 1, стрелка 1). В этом случае ИА только сообщает ЛПР о принятых и реализованных решениях по управлению СЭ [16].

Рассмотрим кратко принцип функционирования ИА. Пусть $P_{fg} = \{p_{fg1}, p_{fg2}, \dots, p_{fgm}\}$ – множество признаков, описывающих состояние некоторой функционально группы СЭ, например, состояние операционной системы (ОС), которое поступает на вход ИА в процессе мониторинга.

Рис. 1. Функциональная структура ИА для управления качеством услуг связи

Признаки p_{fgi} , $i = \overline{1, m}$, описываются своими лингвистическими переменными:

$$\langle p_{fgi}, T_i, U_i \rangle, \quad (1)$$

где $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ – терм-множество лингвистической переменной;

m – число нечетких значений признака p_{fgi} ;

U_i – базовое множество признака p_{fgi} .

Термы T_j^i ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}$) описываются с помощью соответствующих нечетких множеств A_{ij} , определяемых с помощью значений функций принадлежности $\mu_{A_{ij}}(p_{fgi})$ в соответствующих базовых множествах $p_{fgi} \in U_i$:

$$A_{ij} = \left\{ \left(\mu_{A_{ij}}(p_{fgi}) / p_{fgi} \right) \right\}, p_{fgi} \in U_i. \quad (2)$$

Тогда оценка нечеткой ситуации состояния СЭ ИА формируется на основе иерархического построения машин нечеткого логического вывода Мамдани, как нечеткое множество второго уровня в виде [13–15]:

$$S_{fg} = \left\{ S_{fg}(p_{fgi}) / p_{fgi} \right\}, i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

$$\text{где } S_{fg}(p_{fgi}) = \left\{ \left(\mu_{A_{ij}}(p_{fgi}) / T_j^i \right) \right\}, j = \overline{1, k}. \quad (4)$$

Например, состояние ИА, приведенного на рисунке 1, при заданных значениях функциональных признаков «Состояние программного обеспечения (ПО)», «Состояние ОС», «Состояние аппаратной части (АЧ)», «Состояние трафика (ТР)» может описываться следующей нечеткой ситуацией:

$$S_{fgl} = \left\{ \frac{0,9}{\text{ПО:«нормальное»}}, \frac{0,95}{\text{ОС:«нормальное»}}, \frac{0,8}{\text{АЧ:«допустимое»}}, \frac{0,75}{\text{ТР:«допустимое»}} \right\}. \quad (5)$$

Значение общей ситуации состояния СЭ будет иметь вид $S_{fg \text{ общ}} = \langle \text{«допустимое»} \rangle$.

В представленной структуре ИА число иерархических уровней носит условный характер и может быть изменено в соответствии с решением конкретной задачи при проектировании ИА.

На входы машин нечеткого логического вывода первого уровня иерархии поступают векторы признаков $\{p_{fgi}\}$ каждой контролируемой функциональной группы параметров, определяющих функциональное и техническое состояние СЭ. На выходе иерархического слоя

формируется набор оценок нечётких ситуаций $\{S_{fg}^l(i)\}$ состояния СЭ относительно каждой функциональной группы параметров. На следующем уровне иерархии происходит агрегирование этих оценок.

Иерархическая нечеткая ситуационная сеть управления СЭ представима в виде:

$$S_l = \left\langle F_l \left(\{S_{fg}^l\}, \{p_{fgi}\}, R_{fg}^l \right) \right\rangle, \quad (6)$$

где S_l – нечёткая ситуация состояния СЭ; F_l – оператор агрегирования; $\{S_{fg}^l\}$ – множество нечётких ситуаций состояний контролируемых функциональных групп СЭ; $\{p_{fgi}\}$ – множество нечётких параметров состояний контролируемых функциональных групп СЭ; R_{fg}^l – решение по управлению СЭ, получающееся в результате выполнения оптимизационных информационно-расчетных задач с помощью методов нечеткого математического программирования [14].

Обобщенный алгоритм оперативного оценивания состояния СЭ на основании предложенного метода имеет вид [14]:

ШАГ 1. «НАЧАЛО»;

ШАГ 2. «Оценивание технического состояния СЭ»;

ШАГ 3. «Формирование значений нечетких ситуаций по каждой контролируемой функциональной группе СЭ»;

ШАГ 4. «Если $\mu(S_{fg}^l) \geq \mu(S_{fg0}^l) \forall l$, функционирование СЭ штатное»;

ШАГ 5. «Если $\exists l, \mu(S_{fg}^l \text{ доп}) \leq \mu(S_{fg}^l) \leq \mu(S_{fg0}^l)$, то техническое состояние СЭ ухудшилось, но допустимо»;

ДЕЙСТВИЕ: «Подготовка варианта решения для случая дальнейшего ухудшения ситуации, запрос дополнительного ресурса у вышестоящего уровня управления»;

ШАГ 6. «Если $\exists l, \mu(S_{fg}^l \text{ доп}) \geq \mu(S_{fg}^l)$, то техническое состояние СЭ ухудшилось, функционирование невозможно».

ДЕЙСТВИЕ: «Решение для случая отказа СЭ – запрос дополнительного ресурса у вышестоящего уровня управления, перераспределение ресурсов между другими СЭ, если ресурс получен, то восстановление СЭ, если нет – вывод СЭ из состава сети. СЭ восстановлен?»

ДА – продолжить мониторинг. Переход к шагу 2. **НЕТ** – переход к шагу 7»;

ШАГ 7. «КОНЕЦ».

Метод и алгоритм оценки параметров трафика реализуется на основе концепции условной нелинейной Парето-оптимальной фильтрации В.С. Пугачева. Ее суть заключается в следующем [16].

Наблюдения трафика имеют вид случайной последовательности (СП) $x(i)$, заданной в дискретные моменты времени $t = i = \{1, 2, \dots, n, \dots\}$, с конечными значениями математического ожидания и дисперсии и описываются нелинейной аддитивно-мультипликативной моделью:

$$x(i) = \theta(i) \cdot \omega(i-1) + \xi(i), \quad (7)$$

где $\omega(i)$ – неизвестная случайная функция от наблюдений, $\theta(i)$ – случайная величина, а $\xi(i)$ – помеха наблюдений с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией. Векторный критерий оценивания математического ожидания СП $x(i)$ и его среднеквадратического отклонения (СКО) имеет вид:

$$J(i) = M\{\bar{\varepsilon}\} = \left\{ M(m(i) - \hat{m}(i))^2 \rightarrow \min, \right. \\ \left. M(\sigma(i) - \hat{\sigma}(i))^2 \rightarrow \min \right\}, \quad (8)$$

где $\hat{m}(i)$, $\hat{\sigma}(i)$ – оценки математического ожидания и СКО СП $x(i)$ на шаге i , а $m(i)$, $\sigma(i)$ – их истинные значения на этом шаге.

Функция прогноза текущего значения математического ожидания СП определяется как:

$$\hat{m}(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(i-k), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где N – размер скользящего окна, который выбирается относительно небольшого размера. Прогноз оценки СКО СП на шаге i производится в этом же скользящем окне:

$$\hat{\sigma}(i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N x^2(i-k) - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(i-k) \right)^2}. \quad (10)$$

Построение корректирующей процедуры выполним для компоненты оценки математического ожидания функционала (8), с дальнейшим обобщением на векторный случай.

Как правило, значение функционала $J(\hat{m}(i))$ не доступно наблюдению, а доступна только реализация его градиента со случайной ошибкой:

$$\nabla Q(\xi, \hat{m}(i)) = \nabla J(\hat{m}(i)) + \xi, \quad \xi \in R^n, \quad (11)$$

где ξ – ошибка наблюдения градиента. Допустим, что ξ – центрированные, некоррелированные ошибки оценки градиента функционала качества. Минимизацию функционала (11) будем проводить с помощью рекуррентного псевдоградиентного алгоритма (ПГА) вида [17]:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) - \lambda_m(i+1) \nabla Q(\xi, \hat{m}(i+1)), \quad (12)$$

где $\nabla Q(\xi, \hat{m}(i+1))$ – некоторое случайное направление движения в фазовом пространстве в точке $\hat{m}(i+1)$, $\hat{m}(i)$ – скорректированная оценка математического ожидания на предыдущем шаге. Отметим, что $\{\lambda_m(i)\}$ – последовательность положительных чисел, которая для стационарного СП должна удовлетворять условиям Дворецкого [17]:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \lambda_m(i) = \infty, \quad \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_m^2(i) < \infty. \quad (13)$$

Реализация функционала качества в точке $\hat{m}(i+1)$ имеет вид:

$$\nabla Q(\xi, \hat{m}(i+1)) = (\hat{m}(i+1) - \hat{m}(i))^2. \quad (14)$$

После преобразований, рекуррентный ПГА оценивания значения математического ожидания будет иметь вид:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1)(\hat{m}(i+1) - \hat{m}(i)). \quad (15)$$

Отметим, что для симметричной плотности распределения значений СП $\hat{m}(i)$ возможно применение ПГА вида:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1)\varphi(\hat{m}(i+1) - \hat{m}(i)), \quad (16)$$

где в качестве функции $\varphi(*)$ может быть использована неубывающая монотонная функция, например, знаковая функция $\varphi(*) = \text{sign}(*)$. Как отмечается в работах [17], ее применение позволяет повысить устойчивость ПГА к случайным ошибкам оценки градиента функционала качества.

Обобщением алгоритма (15) является векторный ПГА оценки параметров СП, имеющий вид [3]:

$$\hat{H}(i+1) = \hat{H}(i) + Z(i+1) \times \nabla Q(i+1), \quad (17)$$

где $\hat{H}(i+1)$ – вектор оценок параметров СП на шаге $i+1$:

$$\hat{H}(i+1) = [\hat{m}(i+1), \hat{\sigma}(i+1)]^T. \quad (18)$$

Матрица $Z(i+1)$ является диагональной матрицей коэффициентов шага оцениваемых параметров.

Структура алгоритмов (15) и (16) инвариантна относительно статистических характеристик СП $x(i)$, с точностью, определяемой точностью идентификации своих параметров. Это утверждение основано на применении центральной предельной теоремы [3]. Его следствием является то, что при любых вероятностных свойствах трафика, структура алгоритма оценки его параметров постоянна, изменяться могут только его параметры.

Для оценивания параметров нестационарных СП условие (13) ограничивает применение ПГА, так как ПГА должен отслеживать изменения значения параметров трафика, а не сходиться к определённым их значениям. Предлагается последовательность $Z(i)$ ограничить снизу постоянными значениями. В этом случае СКО оценки также будет ограничена снизу. Поэтому необходимо найти компромисс между скоростью и точностью оценивания параметров СП [3].

Модули градиентов компонент векторного функционала качества пропорциональны скорости изменения параметров СП. Как отмечается в работах [3, 17], подобные зависимости носят характер трудноформализуемых задач. Предлагается подстройку коэффициентов шага ПГА автоматизировать на основе метода нечеткого логического вывода Такаги-Сугено или на основе его

частного вида – синглтонного логического вывода [18], в виде:

$$\text{ЕСЛИ } <\hat{H}(i) \in D1>$$

$$\text{или } <\nabla Q(i) \in D2> \text{ или } <\hat{\sigma}(i) \in D2> \quad (19)$$

$$\text{ТО } Z(i+1) = Z(l) \text{ и } N = Nk.$$

Для реализации этих правил предварительно проводится обучение системы нечеткого логического вывода по экспериментальным данным, полученным на стадии ее проектирования [3].

Известно несколько вариантов аналитической аппроксимации зависимости средней временной задержки от параметров потока и характеристик обслуживающего прибора для систем массового обслуживания (СМО) класса $G/G/1$ [19]. Одним из наиболее часто применяемых функциональных представлений является зависимость, полученная в работах [20], в которых верхняя граница суммарного времени задержки обслуживания заявки и её передачи в линию связи имеет вид:

$$t_{k,l} \leq \frac{\rho_{k,l}}{\lambda_{k,l}} + \frac{K_{a\ k,l}^2 + \rho_{k,l}^2 \cdot K_{b\ k,l}^2}{2 \cdot \lambda_{k,l} (1 - \rho_{k,l})}, \quad (20)$$

где $t_{k,l}$ – время задержки обслуживания и её передачи в линию связи;

$\lambda_{k,l}$ – значение интенсивности входящего потока;

$\rho_{k,l}$ – коэффициент использования линии связи;

$K_{a\ k,l}^2$ – квадрат коэффициента вариации входящего потока;

$K_{b\ k,l}^2$ – квадрат коэффициента вариации процесса обслуживания заявки в линии (k, l) .

В выражении (20) все входящие величины могут быть оценены с помощью ПГА (15–17).

Вероятность потери пакетов P_{loss} для КМСС с ограниченным буфером определяется для системы типа $G/G/1/N$, которая является наиболее общей моделью, в соответствии с выражением [20]:

$$P_{loss} \approx \frac{1 - \rho}{2} \rho^{\frac{2}{K_a^2 + K_b^2} N}, \quad (21)$$

где ρ – коэффициент использования линии связи;

N – емкость буфера;

K_a^2 – значение квадрата коэффициента вариации входного трафика;

K_b^2 – значение квадрата коэффициента вариации процесса обработки трафика на узле коммутации.

Эти значения, а также текущие значения интенсивностей трафика предлагается оценивать с помощью ПГА (15–17). Для СМО типа $M/M/1/N$ выражение (21) упрощается и может иметь следующий вид:

$$P_{loss} \approx \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} \rho^N, \text{ или,} \quad (22)$$

$$\text{при } \rho^N \ll 1, P_{loss} \approx \rho^N.$$

Для сети передачи данных, в которой M узлов коммутации пакетов, общая вероятность потери пакетов вычисляется в соответствии с правилом [20]:

$$P_{loss \text{ общ}} \approx 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{loss i}). \quad (23)$$

Разработанные подходы по оценке текущей нечеткой ситуации состояния СЭ позволяют реализовывать практически все механизмы обеспечения QoS в КМСС.

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В численном эксперименте оценивалось общее состояние СЭ по функциональным группам: производительность процессорного модуля, состояние программного обеспечения, электрические параметры процессорного модуля и интерфейсов СЭ.

В качестве примера, на рисунке 2 и 3 представлены характеристики системы нечёткого вывода для оценки нечёткой ситуации состояния электрических параметров СЭ функциональной группы «АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ». На этих рисунках представлены одномерные и двумерные функции принадлежности (ФП) возможных значений этих параметров.

а) ФП параметра «электропитание»

б) ФП параметра «затухание»

в) ФП параметра «сопротивление интерфейсов»

г) ФП значения нечёткой ситуации $S_{общ1}$

Рис. 2. Входные и выходные ФП ИА электрических параметров

а) ФП «электропитание - сопротивление интерфейсов»

б) ФП «электропитание - затухание»

Рис. 3. Пример двумерных ФП

а) 1 – пуассоновский поток при известных характеристиках; 2 – пуассоновский поток, относительная ошибка оценки $K_{a k,l}$ 5%; 3 – логнормальный поток с $K_{a k,l} = 1,4$

б) 1 – логнормальный поток с $K_{a k,l} = 1,4$; 2 – логнормальный поток с $K_{a k,l} = 1,4$, относительная ошибка оценки $K_{a k,l}$ 5%

Рис. 4. Среднее время задержки обработки трафика на СЭ

В данном вычислительном эксперименте все ФП имеют трапецеидальный вид, довольно просто практически реализуются и имеют хорошие аппроксимационные свойства [14].

Проведенный анализ необходимой производительности работы процессорного модуля ИА показал, что для реализации оценки технического состояния СЭ достаточно иметь его производительность на уровне 1,8–1,9 Гфл. В этом случае время цикла принятия управленческого решения составит приблизительно $15\text{--}70 \times 10^{-6}$ с (15–70 мкс). Точность алгоритма оценки состояния СЭ во многом определяется характеристиками первичных сенсоров анализируемой информации. Все выполненные эксперименты показали высокую устойчивость функционирования иерархической нечеткой ситуационной сети. Недостоверных выходных лингвистических переменных в ходе эксперимента зафиксировано не было.

Точностные характеристики алгоритмов (15)–(17) достаточно подробно исследованы в [3]. Показано, что средняя относительная погрешность оценки параметров трафика КМСС для распределения Парето не превышает 10%. В остальных случаях эта погрешность не превосходит 5–7 %.

На рисунке 4 приведены зависимости суммарного времени задержки обслуживания заявки и её передачи в линию связи в соответствии с (20).

Проведенные исследования показали, что оценка среднего времени задержки обслуживания заявки и её передачи в линию связи производится со средней относительной погрешностью, имеющей значение менее 10%. Следует отметить, что предложенный метод оценки параметров трафика позволяет оценивать текущий прогноз времени задержки обслуживания заявки, что имеет важное значение для реализации механизмов оперативного управления показателями QoS КМСС.

Зависимости вероятностей потери пакетов от значений размеров буферов СЭ $P_{loss} = \mathcal{G}(N)$, при заданных значениях ρ , приведены на рисунке 5. Из приведенных зависимостей следует, что при имеющейся текущей оценке параметров трафика можно оценивать в виде текущего прогноза величины размеров буферов СЭ для обеспечения требуемых показателей QoS. Средняя относительная ошибка прогноза величины буфера, при высоких значениях коэффициента использования канала ρ , не превышает 6–8%, что является достаточным значением при оперативном управлении СЭ.

4 Выводы

Анализ результатов моделирования интеллектуального метода и алгоритмов оперативного оценивания состояния СЭ для обеспечения QoS в КМСС показал возможность его функционирования в режиме, близком к режиму реального времени. Задержка принятия управленческого решения составляет не более нескольких десятков микросекунд. При этом средняя относительная погрешность оценки основных технических характеристик СЭ и параметров сетевого трафика не превышает 10%, что является достаточным значением для реализации задач оперативного управления СЭ и сетевым домом в целом.

Предложенный метод может функционировать как в модели интегрированных, так и в модели дифференцированных услуг обеспечения QoS услуг связи в КМСС.

Автоматизированные системы, которые реализуют предложенный метод, могут быть отнесены к системам нового класса, занимающего промежуточное положение между классом систем принятия и классом систем поддержки принятия решений.

К достоинствам предложенного метода следует отметить то, что ИА системы адаптируются к сетевой архитектуре и адекватно отвечают на изменения в конфигурации сетевого оборудования, они распределены по

а) $1 - \rho = 0,4$; $2 - \rho = 0,8$; $3 - \rho = 0,9$

а) $1 - \rho = 0,8$; $2 - \rho = 0,85$

Рис. 5. Зависимости вероятностей потери пакетов от значений размеров буферов СЭ

всем СЭ в КМСС, что позволяет рационально распределить вычислительные ресурсы.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать о гибкой возможности аппаратно-программной реализации данного метода как на универсальных процессорах, так и на основе технологии программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, FPGA).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-T: General principles and general reference model for Next Generation Networks. Recommendation Y.2011 – Geneva, 2004. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2011-200410-I/en> (дата обращения: 30.04.2020).
2. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
3. Ageev S.A., Saenko I.B., Kotenko I.V. Method and Algorithms of Anomaly Detection in Multiservice Network Traffic based on Fuzzy Logical Inference // Informationsno – upravliaiushchie systemy [Information and Control systems]. 2018. No 3. pp. 61–68.
4. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчёта показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. 389 с.
5. RFC 2205: Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc2205> (дата обращения: 28.04.2020).
6. RFC 3550: RTP: A Transport Protocol for real – Time Applications. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc3550> (дата обращения: 28.04.2020).
7. Recommendation ITU – T Y.1540. Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters, 2011. (Recommendation ITU-T Y.1540 defines parameters that may be used in specifying and assessing the performance of speed, accuracy). URL: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=Y.1540> (дата обращения: 30.04.2020).
8. Recommendation ITU – T Y.1541. Network performance objectives for IP – based services. December 2011. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I> (дата обращения: 30.04.2020).
9. Recommendation ITU – T Y.1221. Traffic control and congestion control in IP – based networks. June 2010. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1221/en> (дата обращения: 30.04.2020).
10. Sefz N. QoS Standarts for IP – Based Networks // IEEE Communication Magazine. June 2003. pp. 82–89.
11. ITU-T: Recommendation M.3010. Principles for a telecommunications management network. – 2000. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3010> (дата обращения: 30.04.2020).
12. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
13. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – 2-е издание, стер. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 284 с.
14. Method of monitoring of technical condition of multiservice communication network on the basis of hierarchical fuzzy inference / S.A. Ageev, A.A. Gladkikh, D.V. Mishin, A.A. Privalov // Fuzzy Technologies in the Indasry - FTI 2018 Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Ulyanovsk, USTU. 2018. pp. 211–221.
15. Mamdani E., Efstathion H. Higher-order logics for handling uncertainty in expert systems // Int. J. Man-Mach. Stud. 1985. No. 3. pp. 243–259.
16. Пугачев В.С. Условно оптимальная фильтрация и экстраполяция непрерывных процессов // Автоматика и телемеханика. 1984. № 2. С. 82–89.
17. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Псевдоградиентные алгоритмы адаптации и обучения // Автоматика и телемеханика. 1973. № 3. С. 45–63.
18. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control // IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics. 1985. Vol. 15, no. 1. pp. 11–132.

19. Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Сети связи : учеб. для ВУЗов. – СПб. : БХВ, 2011. – 400 с.

20. Kleinrock L. Queueing Systems, Volume II: Computer Application. New York. Wiley-Interscience, 1976. 576 p.

REFERENCES

1. ITU-T: *General principles and general reference model for Next Generation Networks. Recommendation Y.2011*. Geneva, 2004. Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2011-200410-I/en> (accessed 30.04.2020).

2. Shelukhin O.I., Osin A.V., Smolskii S.M. *Samopodobie i fraktaly. Telekommunikatsionnye prilozheniia* [Self-Similarity and Fractals. Telecommunication Application]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 368 p.

3. Ageev S.A., Saenko I.B., Kotenko I.V. Method and Algorithms of Anomaly Detection in Multiservice Network Traffic based on Fuzzy Logical Inference. *Informatsionno – upravliaiushchie systemy* [Information and Control systems], 2018, no. 3, pp. 61–68.

4. Nazarov A.N., Sychev K.I. *Modeli i metody rascheta pokazatelei kachestva funktsionirovaniia uzlovogo oborudovaniia i strukturno-setevykh parametrov setei sviazi sleduiushchego pokoleniia* [Models and Methods for Calculating the Node Equipment Performances and Network Parameters of the Next Generation]. Krasnoyarsk, LLC Polikom Publ., 2010. 389 p.

5. RFC 2205: *Resourse ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification*. Available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc2205> (accessed 28.04.2020).

6. RFC 3550: *RTP: A Transport Protocol for real – Time Applications*. Available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc3550> (accessed:28.04.2020).

7. *Recommendation ITU – T Y.1540. Internet Protocol Data Communication Service – IP Packet Transfer and Availability Performance Parameters, 2011*. (Recommendation ITU-T Y.1540 defines parameters that may be used in specifying and assessing the performance of speed, accuracy). Available at: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=Y.1540> (accessed 30.04.2020).

8. *Recommendation ITU – T Y.1541. Network Performance Objectives for IP – Based Services*. December 2011. Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I> (accessed 30.04.2020).

9. *Recommendation ITU – T Y.1221. Traffic Control and Congestion Control in IP – Based Networks*. June 2010.

Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1221/en> (accessed 30.04.2020).

10. Sefz N. QoS Standards for IP – Based Networks. *IEEE Communication Magazine*, June 2003, pp. 82–89.

11. ITU-T: *Recommendation M.3010. Principles for a Telecommunications Management Network*. 2000. Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3010> (accessed 30.04.2020).

12. Pospelov D.A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriia i praktika* [Situation Management. Theory and Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 288 p.

13. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. *Nechetkie modeli i seti. 2-e izd., stereotip*. [Fuzzy Models and Networks. 2nd reprint Edition]. Moscow, Goriachaia liniia – Telekom Publ., 2012. 284 p.

14. Ageev S.A., Gladkikh A.A., Mishin D.V., Privalov A.A. Method of Monitoring of Technical Condition of Multiservice Communication Network on the Basis of Hierarchical Fuzzy Inference. *Fuzzy Technologies in the Industry - FTI 2018. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Ulyanovsk, USTU Publ., 2018, pp. 211–221.

15. Mamdani E., Efstathion H. Higher-Order Logics for Handling Uncertainty in Expert Systems. *Int. J. Man-Mach. Stud.*, 1985, no. 3, pp. 243–259.

16. Pugachev V.S. Uslovno optimalnaia filtratsiia i ekstrapoliatsiia nepreryvnykh protsessov [Conditionally Optimal Filtering and Extrapolating of Continuous Processes]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1984, no. 2, pp. 82–89.

17. Polyak B.T., Tsypkin Ia.Z. Psevdogradientnye algoritmy adaptatsii i obucheniia [Pseudogradient Adaptation and Training Algorithms]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1973, no. 3, pp. 45–63.

18. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 11–132.

19. Goldshtein B.S., Sokolov N.A., Ianovskii G.G. *Seti sviazi. Ucheb. dlia VUZov* [Communication Network. Handbook for Universities]. St. Petersburg, BHV Publ., 2011. 400 p.

20. Kleinrock L. *Queueing Systems, Volume II: Computer Application*. New York. Wiley-Interscience, 1976. 576 p.