

## ОТЗЫВ

официального оппонента Аджемова Артема Сергеевича на диссертацию Волкова Артема Николаевича, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук, на тему: «Разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия» по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Современные телекоммуникации, а точнее инфокоммуникации стали одним из решающих факторов в развитии любого государства во всех его областях: на производстве и в управлении, в науке и образовании, в медицине и социальной сфере, и т.д., и т.д. Согласно этому, глубокую модернизацию и трансформацию претерпевают сети связи, обеспечивающие доставку различных сообщений с требуемыми показателями качества. При этом необходимо отметить быстро нарастающее разнообразие пользователей современных сетей, в том числе за счет появления различных «вещей», приборов, датчиков и компьютеров. Начиная с 2010 года, нагрузка, создаваемая ими, сравнялась с нагрузкой, создаваемой людьми, и в настоящее время продолжает увеличиваться опережающими темпами. При этом эти «новые» пользователи сетей предъявляют разнообразные требования к ресурсам сетей связи, существенно отличающиеся от того, что было до этого в отношении услуг по передаче текстовой, речевой и видео информации для людей.

В этой связи возникла необходимость в новой стратегии по распределению ресурсов сети, и, в частности, для нового подхода к сервисам сети с учетом необходимости предоставления услуг телеприсутствия.

Развитие представлений по распределению ресурсов сети привело к появлению туманных вычислений, а для предоставления услуг телеприсутствия с требуемым качеством возникла концепция метавселенных. А все это вместе и привело к постановке целого ряда новых и весьма значимых научных задач, решение которых должно обеспечить

обоснованное комплексное преобразование архитектуры сети на основе туманных вычислений и предоставление услуг пользователям с использованием технологий телеприсутствия.

В этой связи, тема диссертационной работы представляется несомненно актуальной и перспективной, имеющей большое научное и практическое значение с учетом скорости изменения и модернизации современных инфокоммуникаций, основой которых являются соответствующие сети связи.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа содержит 330 страниц машинописного текста, 57 рисунков, 8 таблиц, список литературы включает 365 наименований.

Все материалы, оформленные надлежащим образом, являют собой законченный труд с ясно сформулированной задачей и ее решением. Помимо этого, представлены рекомендации по практическому использованию. Четко и понятно сформулирована научная новизна и приведены доказательства, подтверждающие достоверность полученных результатов.

Список используемой литературы является достаточно полным и отражает не только достижения автора диссертации, но и ряда других исследователей, в том числе зарубежных, работающих в данном или близком направлениях. Публикации автора доказывают актуальность и научную значимость исследуемых им проблем. Помимо этого, это подчеркивает широкую апробацию результатов среди известных профессионалов и научной общественности на различных конференциях и форумах.

Представленный автореферат диссертации, с учетом требований по его объему, убедительно отражает полученные основные результаты и может служить надежным источником информации, характеризующим выполненную диссертационную работу.

Во введении автор обосновывает постановку задачи и ее актуальность с учетом быстро меняющихся технологических решений на сетях связи. При

этом в отличии от традиционных направлений исследования формулирует нетривиальную проблему по разработке и исследованию комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия в мультивселенной при использовании костюмов телеприсутствия, что можно отнести к первым работам в этой области, поскольку данные перспективные сервисы находятся только в стадии разработки.

Четко сформулированы научная новизна и практическая ценность, а также положения, выносимые на защиту. Последующее более внимательное изучение материалов диссертации позволяет сделать вывод об их значимости и нетривиальности, что подтверждает научную и практическую ценность.

Первая глава посвящена анализу направлений развития сетей будущего с наличием совершенно новых услуг с еще не до конца понятными характеристиками по нагрузке и требованиями к телекоммуникационной среде. В данной главе приводится подробное описание проблемы и направлений ее решения с учетом наработок и рекомендаций со стороны Международного союза электросвязи (МСЭ). Представлен анализ перехода от сетей IMT-2020 к сетям IMT-2030, учитывая положения национальной стратегии развития сетей связи Российской Федерации. Приводится описание архитектурных решений для туманных вычислений, что позволит ускорить разработку и внедрение услуг телеприсутствия. Следует также отметить весьма ценное подробное описание и анализ рекомендаций МСЭ по данной проблеме, поскольку появление новых сервисов, порождаемых в различных государствах и компаниях, в последствии получают свою стандартизацию с установленными параметрами качества в этой международной организации. Приводится также анализ одного из важнейших направлений развития современных и перспективных сетей связи, а именно глубокой интеграция инструментов искусственного интеллекта в системы управления сетевыми и вычислительными ресурсами, базирующимися на больших данных и

знаниях, полученных с помощью интегрированных процессов и моделей машинного обучения.

Во второй главе рассматривается новая архитектура сетей на основе туманных вычислений. Справедливо отмечается, что, начиная от появления идей интернета «вещей», стало понятно, что быстро увеличивающееся количество пользователей с разнообразными требованиями к телекоммуникациям, требует серьезных трансформаций в архитектуре сетей. Например, появилось требование об очень малой задержке в 1 мс, что оказывается необходимым в реализации новых сервисов, например, по тактильному интернету. Разрабатываются решения по передаче голографических изображений, различных чувственных ощущений, например, запахов и т.д. Все это требует в новой архитектуре предусмотреть с одной стороны автономность отдельных фрагментов интегрируемой сети, а с другой обеспечить общность решений на основе туманных вычислений. При этом в диссертации были исследованы пути достижения указанных целей и проведено соответствующее моделирование разработанных решений.

Задача обеспечения стабильности кластера в динамических туманных вычислениях рассмотрена в третьей главе на примере сети в сельской и трудно доступной местности. Предложено использовать распределенные оркестраторы интегрированной сети с применением туманных вычислений и динамической кластеризацией. Обосновывается выбор модели сети на основе точечного процесса Неймана-Скотта. Приводятся результаты моделирования, что является убедительным доказательством эффективности разрабатываемой модели

В четвертой главе рассмотрены проблемы интеграции бессерверной архитектуры и динамических туманных вычислений. Предложены модели и методы функционирования сети при этих условиях, а также метаэвристический алгоритм ее функционирования. Вполне обоснованно рассматриваются вопросы «зеленой повестки» ИКТ, что стало реальной

проблемой с увеличением количества ЦОДов и в определенном смысле «неожиданно» связало проблемы реализации современных бурно развивающихся инфокоммуникаций с экологическими проблемами, накладывающими на это вполне обоснованные ограничения. Важно отметить также полученные результаты моделирования, имеющие практическое значение.

Пятая глава посвящена задаче маршрутизации в динамических туманных вычислениях, что безусловно актуально в таких сложных и разветвленных системах, как сети связи с меняющейся нагрузкой от разнообразных абонентов с различными требованиями по качеству доставляемых сообщений. Поэтому несомненно заслуживает высокой оценки, полученный результат, позволивший за счет разработанного метода миграции микросервисов получить снижение потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

В шестой главе рассмотрены очень интересные и с огромной перспективой объекты метавселенной. Проанализированы проблемы передачи данных к ним и от них, и, в частности, в процессе взаимодействия с костюмом телеприсутствия. Описана работающая модель метавселенной, созданная при участии автора диссертации, на которой в реальном времени можно проводить необходимые эксперименты и проверять теоретические положения, что несомненно подтверждает практическую важность результатов, полученных в диссертационной работе.

Полученные автором важные научные результаты получили подтверждение путем соответствующего моделирования, что позволило внедрить их в методике планирования сетей связи ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ», а также в работах Научно-исследовательского института радио (НИИР). Кроме того, результаты использованы в учебном процессе в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Результаты диссертационной работы получили и международное признание, что нашло свое отражение в международных стандартах (рекомендациях) сектора стандартизации электросвязи МСЭ.

Отмечая значительную работу автора и достигнутые им результаты, имеющие научную ценность и практическую значимость следует отметить и ряд недостатков.

1. Выводы по главам сформулированы зачастую не как выводы, а как перечисление того, что было изложено в данной главе.
2. Объем первой главы соизмерим с объемом всех остальных пяти глав, что затрудняет понимание ценности каждой из них, тем более, что первая глава носит в большей степени описательный характер. Ряд материалов первой главы можно было бы вынести в приложение сохранив наиболее важные результаты анализа.
3. Во второй главе следовало бы больше внимания уделить проблеме надежности и устойчивости функционирования предложенной архитектуры, что зачастую конфликтует с желанием добиться высоких показателей по эффективности. Не хватает соответствующих количественных оценок.
4. Третья глава имеет более общее название при сравнении с материалом, который в ней содержится.
5. Используемые в тексте термины «ультрамалая задержка», «сверхнадежные сети», «максимальная автономизация/интеллектуализация инфраструктуры» и т.д., хотя и получили употребление во множестве документов, в том числе и в международных, все же должны использоваться более аккуратно в диссертационной работе, поскольку не содержат количественных оценок, что недопустимо при практической реализации тех или иных решений и особенно, когда известны потенциально достижимые границы по данным параметрам.

6. На стр. 191 читаем: «Научной задачей, исследуемой и решаемой в третьей главе является разработка модели...». Но данный материал относится к четвертой, а не к третьей главе.
7. Есть ряд грамматических погрешностей и неудачных редакционных решений, например, на стр.221 «Следовательно, большинство возникших задач в туманных вычислениях истекают от вышеуказанной противоречивости».

Указанные недостатки, хотя и влияют на качество представленной диссертации, однако не изменяют общего вывода о ее ценности, как законченной научно-квалификационной работы на актуальную тему, соответствующую заявленной специальности.

Диссертационная работа Волкова Артема Николаевича соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а именно, соответствует п.9 “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 "О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», отражает значимое научное достижение, имеющее важное хозяйственное значение, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Президент – председатель Попечительского совета  
Московского технического университета связи и информатики,  
заведующий кафедрой «Общей теории связи»,

д.т.н., профессор

Аджемов Артем Сергеевич

Подпись Аджемова А.С. заверяю

Проректор по научной работе

Лескин Ю. Л.

«31» октября 2024г.

