

## **Отзыв официального оппонента**

Никульского Игоря Евгеньевича на диссертацию

Мутханны Аммара Салеха Али

на тему:

**«Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений»,**  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности

2. 2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

### **1. Актуальность темы диссертации**

Современная концепция Информационного Общества предусматривает широкое внедрение самых современных информационно-телекоммуникационных технологий, как в мобильном, так и в фиксированном секторах информационно-телекоммуникационной инфраструктуры в рамках самых современных концепций. При этом особую актуальность приобретают исследования технологий мобильных сетей 5G, 6G взаимосвязанных с широким применением Интернета Вещей и Тактильного Интернета укладывающихся в концепцию Интегрированных сетей Космос – Воздух - Земля - Море.

Поскольку представленная диссертационная работа посвящена исследованию именно этих вопросов, актуальность ее темы не вызывает сомнения.

**2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Достоверность результатов диссертационной работы, научная новизна**

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, четко обоснованы.

Основные результаты и выводы в диссертации являются новыми.

## **Степень достоверности и апробация результатов.**

Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурального и имитационного моделирования, а также широким спектром публикаций и выступлений, как на российских, так и на международных научных конференциях.

### **Научная новизна результатов исследования**

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Решена научная задача, отличающаяся от известных тем, что предложен метод построения мультиконтроллерной сети, основанный на интегральном решении задач по размещению контроллеров в мультиконтроллерных сетях, базирующийся на метаэвристическом алгоритме вследствие сложности решаемых задач, и алгоритме балансировки нагрузки, позволяющем обеспечить наилучшее использование ресурсов контроллеров в таких сетях.
2. Для решения научной задачи интеграции размещения контроллеров в мультиконтроллерных сетях и балансировки нагрузки предложено использовать в отличие от известных решений иерархическую кластеризацию мультиконтроллерной сети, включающую в себя кластеры с головными узлами и централизованный контроллер, что обеспечивает балансировку нагрузки в разработанном методе построения сети.
3. Для решения научной задачи интеграции контроллеров в мультиконтроллерных сетях и балансировки нагрузки в отличие от известных решений разработан модифицированный алгоритм хаотического роя сальп для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA, что позволяет уменьшить долю отказов в обслуживании со стороны контроллера и увеличить общее использование системы во всем диапазоне изменения задержки от 1мс до 10мс по сравнению как с широко известными

метаэвристическими алгоритмами роя частиц PSO (Particle Swarm Optimization) и серого волка GWO (Grey Wolf Optimization), так и с предыдущей версией хаотического алгоритма роя сальп CSSA (Chaotic Salp Swarm Algorithm). При этом для наиболее сложного случая задержки величиной в 1мс выигрыш по доле отказов и по общему использованию системы достигает значения более, чем в 2 раза.

4. Для решения научной задачи интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности разработаны модель сети, отличающаяся от известных тем, что предложено для уменьшения задержки и энергопотребления в такой сети использовать мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА и метод выгрузки трафика с наземной сети на мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА, отличающийся от известных тем, что процедура выгрузки трафика является трехуровневой, причем на оконечных устройствах используется программный профилировщик, который определяет сложность вычисляемой задач и по результатам его работы механизм принятия решения определяет необходимость выгрузки трафика. Кроме того, на втором уровне процедуры выгрузки трафика сервер БПЛА, на который выгружается трафик, может принять решение в условиях недостаточного объема ресурсов выгрузить трафик на сервер другого БПЛА. Результаты моделирования доказали, что разработанные модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают уменьшение задержки до более, чем в 2 раза по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений и на 30-40% по сравнению с сетью с использованием только наземных граничных вычислений. Кроме того, использование оптимизации на основе метаэвристического хаотического роя сальп дает дополнительный выигрыш около 10% по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

5. Результаты моделирования доказали, что разработанные модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают уменьшение энергопотребления до более, чем в 2 раза по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений. Кроме того, использование оптимизации на основе метаэвристического хаотического роя салп дает дополнительный выигрыш в 5-10% по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.
6. Результаты моделирования доказали, что разработанные модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают уменьшение доли заблокированных задач по выгрузке трафика в десятки раз по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений, в разы по сравнению с сетью с использованием только наземных граничных вычислений. Использование оптимизации на основе метаэвристического хаотического роя салп не дает практически значимого эффекта по сравнению с неоптимизированным алгоритмом. Кроме того, определены зависимости значений задержки, энергопотребления и доли заблокированных задач по выгрузке трафика от плотности сети.
7. В отличие от известных решений предложен новый метод построения сети с использованием технологий MEC, SDN и D2D для поддержки приложений беспилотных автомобилей. Предлагаемая архитектура направлена на преодоление двух основных проблем автомобильных сетей – высокой плотности трафика и наличия непокрытых зон в автомобильной сети связи. При этом, разработан также алгоритм кластеризации на основе взаимодействий D2D для транспортных средств в непокрытых зонах и для выгрузки трафика сети в регионах с интенсивным движением. Результаты моделирования показывают, что предложенная архитектура дает 74% прироста производительности системы в терминах вероятности блокировки задач.

8. Разработан метод прогнозирования трафика на основе CNN - LTP-CNN, который предсказывает трафик сети IoT на базе состояния сети за предыдущий интервал времени, отличающийся от известных тем, что алгоритм прогнозирования реализован на туманных узлах, которые представляют собой основную часть сетей IoT/5G. Результаты показывают, что разработанный LTP-CNN может предсказывать трафик сети IoT с точностью около 90%.
9. Разработан метод размещения SDN-контроллеров в мультиконтроллерных сетях, отличающийся тем, что контроллеры могут располагаться на мобильных узлах сетей VANET, например, автобусах, для обеспечения связи в плотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети, что позволяет уменьшить задержку на 60% по сравнению с традиционными моделями граничных вычислений на базе SDN, а также снизить потребляемую энергию на 72% по сравнению с методом Fog-MEC на базе SDN.

### **3. Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в разработке и исследовании комплекса моделей и методов интеграции граничных и/или туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений для глобального фрагмента Воздух-Земля концепции SAGSIN. Это закладывает основы для перехода сетей связи общего пользования в среднесрочной перспективе к интегрированным сетям.

Важными результатами, имеющими существенную теоретическую ценность, представляются метод построения мультиконтроллерной сети, основанный на интегральном решении задач по размещению контроллеров в мультиконтроллерных сетях, базирующийся на метаэвристическом алгоритме вследствие сложности решаемых задач, и алгоритме балансировки нагрузки, позволяющем обеспечить наилучшее использование ресурсов контроллеров в

таких сетях, решения по иерархической кластеризации мультиконтроллерной сети, модифицированный алгоритм хаотического роя сальп для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA, трехуровневая процедура выгрузки трафика, модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности. Самостоятельную научную ценность имеет метод размещения SDN-контроллеров в мультиконтроллерных сетях на мобильных узлах сетей VANET, например, автобусах, для обеспечения связи в плотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети.

**Практическая ценность работы.** Практическая ценность работы состоит в создании научно-обоснованных рекомендаций по интеграции граничных и/или туманных вычислений в современных сетях связи с учетом массового внедрения новых услуг связи, включая услуги телеприсутствия, что реализуется как в методиках планирования сетей связи ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ», так и в международных стандартах (рекомендациях) Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи.

#### **4. Публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертации изложены в 137 опубликованных работах, в том числе в 24 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; в 87 работах в изданиях, включенных в международные базы цитирования; в 2 результатах интеллектуальной деятельности; в 6 отчетах по НИР; в 18 работах в других научных изданиях и материалах конференций.

#### **5. Содержание диссертации**

5.1. Диссертация представлена в виде рукописи, её текст отличается точным, подробным и доходчивым изложением предметной области, описанием объекта и предмета исследования, методов и результатов исследования, оформлен аккуратно, в соответствии с требованиями ГОСТ. Список

использованных литературных источников оформлен также в соответствии с требованиями ГОСТ.

5.2. Материал диссертации изложен в логической последовательности, отвечающей требованиям проведения научных исследований, имеет целостность и внутреннее единство содержания.

5.3. Выводы обоснованы и четко отражают результаты проведенных исследований.

5.4. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа содержит 393 страницы машинописного текста, 75 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 366 наименований.

## **6. Замечания по диссертационной работе**

6.1. На С.131 рукописи диссертации автор работы приводит многосерверную модель очередей для оценки временного отклика контроллера на основе СМО класса M/M/s, но не дает обоснования возможности применения модели простейшего потока и пуассоновского распределения интервалов обслуживания для моделирования рассматриваемого класса процессов.

6.2 Целевой функционал оптимизационной задачи (12) на С. 134 работы не учитывает затрат на эксплуатацию исследуемой сети.

6.3 На С.314 работы приводится исследование доли заблокированных задач при разном количестве доступных задач, при этом автор работы оперирует одним параметром процесса блокировки – вероятностью блокировки, вместе с тем из содержания рукописи диссертации неясно какие распределения интервалов блокировки использовал автор при проведении данного исследования.

6.3 В тексте рукописи диссертационной работы на С. 4, С.42, С.136 и на других имеются незначительные опечатки.

## **7. Выводы и заключения**

Диссертация Мутханны Аммара Салеха Али на тему: «Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений» является законченной научно-квалификационной работой. Диссертационная работа соответствует пунктам : 2,

4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 18 паспорта специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

В диссертации решена научная проблема имеющая важное значение для науки и практики в отрасли телекоммуникаций: а именно – разработан и исследован комплекс моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений. Диссертация отвечает критериям, изложенным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в ред. от 11.09.2021г.).

Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертационной работы.

Несмотря на отмеченные выше замечания, диссертационная работа «Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений» оценивается положительно, а ее автор – Мутханна Аммар Салех Али заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

#### **Официальный оппонент:**

главный специалист отдела 133, зам. главного конструктора,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник

 Игорь Евгеньевич Никульский 12. 10. 2023г.

Подпись И.Е.Никульского заверяю: Начальник отдела кадров  
ПАО «ЦНПО Ленинец»

 « 13 » 10 2023

#### **Сведения об организации:**

Наименование: Публичное акционерное общество «Центральное научно-производственное объединение «Ленинец».

Юридический адрес: 196066, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр. д. 212, лит. А, Холдинговая компания «Ленинец», тел. (812) 6109848, факс: (812)610-98-42, адрес электронной почты: [office@npo-leninets.ru](mailto:office@npo-leninets.ru), адрес сайта: [www.npo-leninets.ru](http://www.npo-leninets.ru).