

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

На правах рукописи

ГОРБАЧЕВА ЛЮБОВЬ СЕРГЕЕВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА И КАЧЕСТВА
ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В СЕТЯХ СВЯЗИ
С УЛЬТРАМАЛЫМИ ЗАДЕРЖКАМИ**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Санкт Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1.АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПЯТОГО И ПОСЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ.....	13
1.1 Сети связи пятого поколения.....	13
1.2 Услуги телеприсутствия и тактильный интернет.....	16
1.3 Сети связи с ультрамалыми задержками в рамках сетей связи шестого поколения.....	19
1.4 Четвертая промышленная революция	20
1.5 Требования к задержкам и вероятности безотказной работы.....	25
1.6 Требования к характеристикам качества обслуживания в сетях связи с ультрамалыми задержками	27
1.7 Выводы по главе	29
ГЛАВА 2.ПОСТРОЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТАКТИЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ.....	31
2.1 Модельные сети и области их применения.....	31
2.2 Первоочередной набор услуг телеприсутствия.....	33
2.3 Реализация модельной сети	34
2.4 Компоненты модельной сети сегмента роботов-манипуляторов.....	36
2.5 Многофункциональный робот-манипулятор Dobot Magician.....	36
2.5.1 DWDM система	47
2.5.2 Аттенюатор	50
2.5.3 Сеть доступа	51
2.5.4 Программное обеспечение	53
2.5.5 Программное обеспечение для перехвата и анализа трафика.....	54
2.6 Порядок проведения исследований на базе модельной сети.....	57
2.7 Методика тестирования системы тактильного интернета с использованием сегмента роботов-манипуляторов	59
2.8 Выводы по главе	59

ГЛАВА 3.ИССЛЕДОВАНИЯ НА БАЗЕ МОДЕЛЬНОЙ СЕТИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА И КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ.....	61
3.1 Проблематика.....	61
3.2 Существующие протоколы, используемые для передачи данных на роботов.....	62
3.3 Сценарий передачи команд по протоколу ТСР.....	63
3.4 Перехват и анализ сетевого трафика.....	64
3.5 Исследование влияния задержек на передачу команд роботу- манипулятору.....	69
3.6 Выводы по главе.....	76
ГЛАВА 4.МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ И ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ.....	78
4.1 Модель взаимодействия робота-манипулятора, системы управления и сети связи.....	78
4.2 Метод повышения эффективности использования ресурсов сети связи.....	80
4.3 Сценарий передачи команд с использованием алгоритма по реализации метода управления обмена данными.....	90
4.4 Перехват и анализ сетевого трафика по улучшенному сценарию.....	92
4.5 Сравнение характеристик сетевого трафика.....	94
4.6 Вероятностные распределения.....	95
4.7 Оценка степени самоподобия сетевого трафика.....	106
4.8 Выводы по главе.....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	112
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ.....	115
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	117

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ УСЛУГ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ, ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫХ НА ОСНОВЕ РОБOTOV- МАНИПУЛЯТОРОВ НА БАЗЕ МОДЕЛЬНОЙ СЕТИ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ВНЕДРЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Развитие сетей связи в настоящее время происходит в направлении создания сетей связи пятого и последующих поколений. В основе развития сетей лежат концепции Интернета Вещей и Тактильного Интернета, реализация которых уже привела к созданию сетей высокой и сверхвысокой плотности и сетей связи с ультрамалыми задержками. Для последних задержки должны составлять от 1 мс до 10 мс в зависимости от приложения. Такие значения задержек позволяют сети связи оказывать целый ряд новых услуг для приложений тактильного Интернета, беспилотных автомобилей, дополненной реальности, голографических изображений, роботов-аватаров, роботов-манипуляторов, телемедицины и т.д. Как правило, такие услуги предполагают дистанционный формат, что привело к появлению нового класса услуг, которые называются услугами телеприсутствия.

Особое внимание исследователей к услугам телеприсутствия усилилось вследствие произошедшей пандемии, что вполне естественно, поскольку общество ожидает решения возникающих в таких ситуациях проблем с помощью телекоммуникационных технологий при таких катастрофических явлениях. При этом был определен первоочередной набор услуг телеприсутствия, в который вошли: телеконференции, голографические изображения с использованием вентиляторов, гибридных очков дополненной реальности и голографии, дополненная реальность для медицины, промышленности и образования, роботы-аватары на базе перчаток и роботизированных рук для выполнения хозяйственной деятельности человека в неблагоприятных условиях внешней среды и при дистанционном уходе за нуждающимися в этом людьми и животными, роботы-манипуляторы и их сообщества для дистанционного управления при выполнении различных задач в хозяйственной деятельности.

Каждая из вышеперечисленных услуг создает сетевой трафик, который должен быть обслужен с требуемыми характеристиками качества обслуживания

и/или качества восприятия. Эти характеристики до настоящего времени не были изучены в должной мере, за исключением, пожалуй, услуг телеконференций. Поэтому одной из основных задач при внедрении услуг телеприсутствия является исследование характеристик трафика для таких услуг и качества обслуживания и/или качества восприятия для них.

В диссертационной работе исследуются характеристики сетевого трафика и качества обслуживания для роботов манипуляторов и разрабатывается метод управления роботами-манипуляторами по сети связи с ультрамалыми задержками для оптимизации использования канала связи. Исследования проводятся с использованием, в том числе, и нового научного инструментария – модельной сети, созданной для изучения характеристик сетей связи шестого поколения и услуг телеприсутствия. С учетом изложенного тема диссертационной работы представляется актуальной.

Степень разработанности темы. В области исследований трафика и качества обслуживания для сетей связи пятого и последующих поколений существует ряд работ отечественных и зарубежных ученых В.М. Вишневого, Б.С. Гольдштейна, В.Г. Карташевского, Р.В. Киричка, А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, С.Н. Степанова, В.О. Тихвинского, А.В. Абилова, А.С. Бородина, Ю.В. Гайдамаки, Е.А. Кучерявого, М.А. Маколкиной, Д.А. Молчанова, А.Н. Волкова, А.С.А. Мутханна, А.А.А. Ateya, M. Dohler, G.P.Fettweis, Z.Li, M. Maier, P.Popovski, T.Taleb, M.Uusitalo и других.

Работы отмеченных выше авторов внесли весомый вклад в исследования характеристик сетевого трафика и качества обслуживания и/или качества восприятия для сетей связи пятого и шестого поколений, в основном для услуг Интернета Вещей, передачи данных, видео, телеконференций и т.п. Однако до настоящего времени практически не уделялось внимания исследованию характеристик трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов и разработке методов управления роботами-манипуляторами по сети связи с ультрамалыми задержками для оптимизации использования канала связи. Это и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы. При этом

решается следующая научная задача в области исследований по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций: исследование характеристик трафика и качества обслуживания для роботов манипуляторов и оптимизация использования канала связи для управления ими.

Объект и предмет диссертации. Объектом исследования являются услуги телеприсутствия в сетях связи с ультрамалыми задержками, а предметом – характеристики трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов.

Цель и задачи диссертации. Цель диссертационной работы состоит в исследовании характеристик трафика и качества обслуживания для роботов манипуляторов и разработка метода управления роботами-манипуляторами по сети связи с ультрамалыми задержками для оптимизации использования канала связи.

Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих задач:

- анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений;
- анализ перспектив предоставления услуг телеприсутствия;
- анализ приложений, реализуемых роботами-манипуляторами на примере роботов семейства Dobot Magican;
- разработка фрагмента модельной сети для исследований сетей связи шестого поколения в части предоставления услуг телеприсутствия для роботов-манипуляторов;
- исследование предельных значений расстояний, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора в сети связи общего пользования;
- исследование характеристик трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего метода с накоплением команд в буфере клиента;
- разработка улучшенного метода управления параметрами обмена данными, который для управления роботами по сети связи общего пользования

использует передачу серии команд, число которых оптимизировано по критерию эффективности использования канала связи;

– разработка и апробация протокола прикладного уровня для роботов-манипуляторов, в котором реализуется указанный выше улучшенный метод управления параметрами обмена данными.

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

– В отличие от известных требований стандартов международных организаций экспериментальным путем на модельной сети определено предельное значение расстояния в 115 км, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения в сети связи общего пользования.

– В отличие от известных результатов определены характеристики трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента.

– Разработан метод управления параметрами обмена и протокол прикладного уровня для роботов-манипуляторов, который в отличие от существующих методов и протоколов для управления роботами по сети связи общего пользования использует передачу серии команд, число которых оптимизировано по эффективности использования канала связи, что позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов, например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%. Величина выигрыша повышается с ростом ошибки выполнения команд. Получаемый выигрыш по эффективности равноценен выигрышу по времени доставки. Уменьшение времени доставки данных происходит за счет уменьшения доли непроизводительной нагрузки.

Теоретическая и практическая значимость диссертации:

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в самом предмете исследования - характеристиках трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками. Полученные характеристики трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента и вновь разработанного метода с использованием передачи серии команд расширяют существующие знания в области теории телетрафика. Самостоятельную теоретическую значимость имеют результаты, полученные экспериментальным путем на модельной сети, в отношении предельного расстояния для устойчивого функционирования роботов-манипуляторов при взаимодействии с сетью связи общего пользования.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования результатов работы для планирования сетей связи, разработки рекомендаций Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного союза Электросвязи (МСЭ-Т), а также в процессе обучения студентов и аспирантов по профильным специальностям. Весомую практическую ценность имеет создание сегмента модельной сети для исследований, тестирования и обучения в лаборатории «Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» (MEGANETLAB 6G) и соответствующей методики тестирования.

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ПАО «ТИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики планирования сетей связи при внедрении роботов- манипуляторов», ФГБУ НИИР в рамках выполнения государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций администрации связи Российской Федерации в части,

касающейся международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложений по вкладам от имени администрации связи Российской Федерации (Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Тактильный Интернет и интернет навыков», «Сети связи с ультра малыми задержками» и «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», а также при выполнении Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации от «06» июля 2022 г. № 075-15-2022-1137 по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации 20а - Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Роботы-манипуляторы устойчиво функционируют на сети связи общего пользования для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при предельном значении расстояния в 115 км от передатчика команд управления по протоколу UDP, что уточняет требования стандартов международных организаций.

2. Определены характеристики трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента.

3. Метод управления параметрами обмена и протокол прикладного уровня для роботов-манипуляторов, которые для управления роботами по сети связи общего пользования используют передачу серии команд, число которых оптимизировано по эффективности использования канала связи, позволяют повысить эффективность использования сетевых ресурсов, например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурального моделирования на модельной сети, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 25-ой международной конференции International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications DCCN (Москва, 26-29 сентября 2022), на онлайн-семинаре по теме «Мобильные робототехнические системы в сельском хозяйстве» (2022), на заседании Исследовательской комиссии 11 “Требования к сигнализации, протоколы, спецификации испытаний и борьба с контрафактными устройствами электросвязи/ИКТ” МСЭ-Т (10 мая – 20 мая 2023), на 78-й научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио СПбНТОРЭС (Санкт-Петербург, 24-28 апреля 2023), на семинарах кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, 1 статья в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS и WoS, 2 статьи в других изданиях, 1 отчет о НИР.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций: п.1, п.7, п.9 и п.19.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПЯТОГО И ПОСЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ

1.1 Сети связи пятого поколения

Начался новый этап в развитии телекоммуникаций – наступило время сетей связи пятого и последующих поколений, которые отличаются от сетей предыдущих поколений высокой плотностью и гетерогенностью, а также численными характеристиками [1]. Международный Союз Электросвязи (МСЭ) закрепил за сетями связи нового пятого поколения аббревиатуру 5G [2].

Предпосылками к развитию данных сетей стали:

- увеличение объема передаваемых данных, связанное с ростом числа подключенных устройств и с использованием различных приложений, что требует более высокой пропускной способности и увеличение емкости сетей связи;
- необходимость обеспечения низких значений сетевой задержки при передаче данных, например, при удаленном управлении устройствами, при автономном вождении беспилотных автомобилей, или при реализации других технологий [2, 3];
- развитие новых технологий, таких как Интернет вещей (Internet of Things – IoT), Тактильный интернет, и появление новых стандартов связи;
- потребности предприятий и отраслей в высокоскоростной и надежной связи для оптимизации процессов и улучшения производительности.

Все эти факторы привели к развитию сетей связи пятого поколения и созданию новых возможностей для передачи данных, подключения устройств и повышения эффективности работы различных устройств в режиме реального времени.

Широкомасштабное развертывание таких сетей планировалось на третье десятилетие 21 века. При этом, на сегодняшний день основной рост трафика и

доходов происходит в части устройств Интернета вещей, являющихся одной из основных целей сетей 5G. Соответственно, можно сказать, что сети 5G – это важная составляющая цифровой экономики и трансформации [4].

Сети связи пятого поколения (5G) - это новое поколение сетей связи общего пользования (далее – ССОП), которое необходимо для обеспечения быстрой и надежной передачи данных, а также поддержки большего количества устройств.

Сети связи ИМТ-2020 содержат в себе целый комплекс концепций, принципов и технологий организации мобильной сети доступа [2]. В отличие от сетей предыдущих поколений, которые реализованы на базе аппаратных решений (оборудования), сети 5G основываются на программных решениях, в основном, на программно-конфигурируемых сетях SDN (Software Defined Network) [5, 6], и виртуализации сетевых функций NFV (Network Function Virtualization) [4, 6].

Таким образом, программно-аппаратная реализация традиционных сетей существенно смещается в сторону программных приложений, которые работают в дата-центрах на серверах и виртуальных машинах VM (Virtual Machines). Что снижает затраты на развертывание сети и на ее обслуживание [4].

Главные особенности сетей связи ИМТ-2020 (5G) заключаются в расширении функциональных возможностей, улучшении характеристик сети, и в достижении удовлетворенности пользователей. Практическими преимуществами сетей 5G являются [7]:

- пропускная способность в канале передачи данных – 20 Гбит/с;
- средняя скорость на пользователя – 100 Мбит/с;
- задержка в сети составляет: для услуг типа eMBB – 4 мс, для услуг типа URLLC – 1 мс; сквозная задержка на уровне управления – 10 мс;
- плотность устройств на 1 кв. км достигает 1 миллиона;
- скорость передачи данных на 1 кв. м составляет 10 Мбит/с;
- мобильность пользователя достигает 500 км/час;
- улучшение энергоэффективности и эффективности использования спектра.

Основными функциональными особенностями сетей 5G являются [8]:

1) Усовершенствованный мобильный широкополосный доступ (eMBB - enhanced MBW) – поддерживает более высокие скорости передачи данных и широкополосный доступ в любом месте. Также реализует более низкие задержки для пользователя даже при высокой мобильности.

2) Сверхнадёжная связь с ультрамалой задержкой URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication) - обеспечивает чрезвычайно низкую задержку (1 мс), высокую доступность, сверхвысокую надежность (99,9999%) и безопасность для беспроводных услуг.

3) Массивная межмашинная связь Massive IoT/IIoT, mMTC (massive Machine Type Communication) - занимается обеспечением высокой плотности каналов для подключения к 1 млн. устройств на кв. км., чтобы удовлетворить потребности сенсорных вещей, Интернета вещей.

Основываясь на данных функциональных особенностях, реализуется всё многообразие услуг и возможностей сетей 5G, например, умный дом/ город, дополненная реальность, промышленная автоматизация, беспилотный транспорт, работа в облаке и т.д.

Однако, развитие технологий сетей связи не стоит на месте. Сети 5G/IMT-2020 привели к бурному росту прикладных решений в каждой из сфер жизни человека. И в 2018 году Международный Союз Электросвязи сформировал группу по сетям связи 2030 (6G), где ученые и исследователи из разных стран работают над новой парадигмой развития телекоммуникаций и ее уточнением по запросам общества и бизнеса. Сети связи 2030 представляют собой сеть сетей и реализуют в полной мере сверхнадёжные сети с ультрамалыми задержками [9, 10, 11].

1.2 Услуги телеприсутствия и тактильный интернет

Услуги телеприсутствия активно входят в нашу жизнь, наиболее распространенные сферы сейчас – это телемедицина, промышленность, офисная работа, проведение бизнес-встреч, обучение, настройка сложного оборудования и т.д.

Телеприсутствие – набор технологий, позволяющий пользователю, с помощью специальных устройств, получить впечатление того, что он находится и воздействует на место, отличное от его физического местоположения [12].

Для обеспечения полного телеприсутствия необходимо, чтобы пользователь получал те же ощущения, как если бы сам находился в другом месте. И все его перемещения, действия, голос и т.д. должны быть считаны, переданы и воспроизведены в удаленной локации и в режиме реального времени.

Для того, чтобы обеспечить пользователю убедительный эффект присутствия, необходим ряд технологий [12]:

- Видео: точка обзора должна реагировать на перемещение и повороты головы пользователя. Также при необходимости можно добиться особо убедительного чувства объёма, и заполнить изображением удалённого места поле зрения пользователя.

- Звук: лучший эффект присутствия даёт стереозвук с отслеживанием движений головы пользователя.

- Манипулирование: возможность манипулировать объектами в удалённой среде - важнейший аспект настоящей системы телеприсутствия, и она может быть реализована по-разному в зависимости от потребностей пользователей.

Такое взаимодействие человека и машины (Human to machine – H2M) на уровне ощущений относится к Тактильному интернету. Согласно отчету ITU-T Technology Watch Report August 2014, Международный союз электросвязи (МСЭ) определяет Тактильный интернет как тактильное взаимодействие с обратной

связью через Интернет, которое сочетает в себе сверхнизкую задержку с чрезвычайно высокой доступностью, надежностью и безопасностью [13, 14].

Тактильный интернет может иметь широкий спектр применений, включая удаленное взаимодействие с объектами виртуальной реальности, удаленное управление роботами или даже возможность чувствовать физические ощущения других людей через сеть.

Взаимодействие человеческих тактильных ощущений может происходить в режиме реального времени, только если сеть обеспечит задержку меньше, чем соответствующая физиологическая константа времени. Так, для мышечного ощущения константа времени равна 1 с, для слухового – 100 мс, для визуального – 10 мс, а для тактильного – 1 мс [13, 15].

Видео и речевой трафик не нуждаются в обеспечении малых задержек, для такого вида данных можно применять сети третьего и четвертого поколений. Также передача статистики или иных данных должны передаваться с помощью иных технологий, включая сети второго поколения. Несмотря на их устаревающие характеристики, они помогают решать специфические задачи будущего [15]. Таким образом, важным становится организация передачи, именно, тактильных ощущений в режиме реального времени.

Особенностью Тактильного интернета является его повышенная доступность надежных высокоскоростных соединений через мобильный и широкополосный Интернет с чрезвычайно малым временем ожидания в обоих направлениях. То есть в сети недопустимы потери, отказ оборудования, изменение порядка выполнения действий, скорость передачи данных должна превышать 10 Гбит/с, и сеть также должна поддерживать более 100 устройств на 1 кв. м. Непрерывное время задержки при подключении не должно превышать порядка 1 мс [14].

Построение Тактильной Интернет-системы можно рассматривать как главный и ведомый домены, соединенные через плотную инфраструктуру оптоволоконных кабелей и сетевых элементов (рис.1). Где главный домен – это пользователь, ведомый домен – управляемый робот [14].

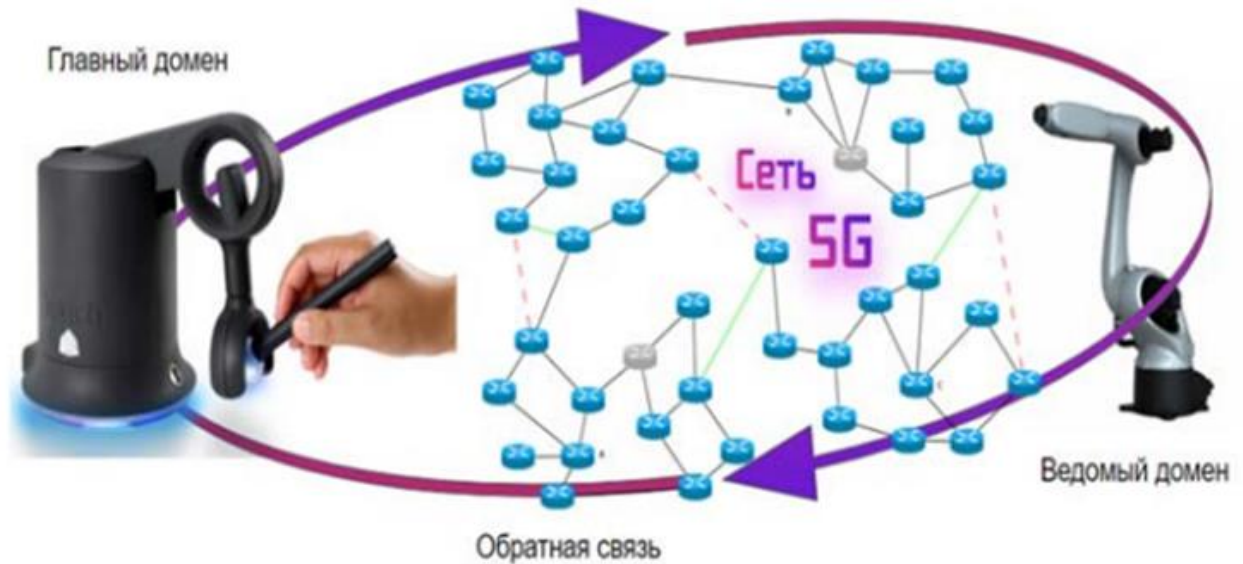


Рисунок 1 – Реализация Тактильного Интернета

Взаимодействие с высокой точностью при передаче ощущений прикосновения из одного места в другое возможно только в том случае, если задержка связи между пользователем и роботом меньше времени реакции человека, т.е. 1 мс. В течение этой миллисекунды движения пользователей должны быть переданы на сервер, где происходит физическое моделирование, а результат вернуться к пользователям в виде обновлений статуса объекта и тактильной обратной связи.

Тактильный Интернет – это концепция, которая сможет преобразить человеческую жизнь, позволив реализовать взаимодействия Н2М в полной мере и с новым качеством. Внедрение концепции Тактильного Интернета обеспечила сеть связи пятого поколения 5G, которая дает возможность подключения большего количества устройств и минимальные задержки [15].

Учитывая, что современные сети рассчитаны на значение задержки в 100 мс, возникла необходимость в пересмотре основных принципов построения сетей связи в условиях пятого поколения для реализации приложений Тактильного Интернета.

Для достижения очень высокой доступности и надежности системы, а также ультрамалой задержки, требуемой для приложений Тактильного Интернета,

требования к составляющим системы очень высоки с точки зрения контекста, контента и мобильности. Поэтому, должна быть выполнена соответствующая системная разработка для сети Тактильного Интернета, обеспечивающая установление соединений между базовым и исполнительным доменами с требуемыми параметрами. Основной задачей при этом является круговая задержка величиной в 1 мс [15]. Так появилась сверх высоконадежная сеть связи с ультрамалыми задержками (URLLC).

1.3 Сети связи с ультрамалыми задержками в рамках сетей связи шестого поколения

Дальнейшим развитием сетей связи является концепция сетей связи с ультрамалыми задержками. Данные сети обязаны своим появлением концепции Тактильного интернета [11]. Изначально, под Тактильным интернетом понималась передача тактильных ощущений на расстоянии, но для их передачи с необходимым качеством обслуживания и восприятия потребовалась круговая задержка в 1 мс, что в сто раз меньше, чем требования по передаче речи.

URLLC позволяют передавать данные в реальном времени, что открывает новые перспективы для взаимодействия и управления удаленными объектами и системами. Благодаря минимальной задержке передачи данных, возможно достичь практически мгновенной передачи тактильных ощущений через сеть.

Таким образом, URLLC выдвигает определенные и при этом жесткие новые требования качества обслуживания (QoS), обеспечение которых позволяет существовать новым типам сервисов. Сети связи с ультрамалыми задержками полностью невозможно реализовать на сетях связи пятого поколения, поэтому они лежат в основе создания сетей связи шестого поколения и сетей 2030.

Основные преимущества сетей связи шестого поколения [16]:

- сверх высокая плотность устройств – 100 устройств на 1 куб. м.;

- задержка на радиодоступе – 0,1 мс;
- пропускная способность сети – 100 Гбит/с – 1 Тбит/с;
- данные по позиционированию, которые не рассматривались в сетях 5G – 10 см в здании, 1 м вне здания.

Для сетей связи 2030 МСЭ запланировал характеристики сети на перспективу. Соответственно, становятся важны такие показатели как [11, 16, 17]:

- круговая задержка менее 1 мс;
- пиковая скорость более 1 Тбит/с;
- повышение надежности – 1 отказ на миллион соединений;
- недоступность сети – 4 мс в сутки;
- коэффициент готовности – 99,9999%;
- персонализация сети и услуги телеприсутствия;
- крупное использование наносетей;
- полновесная реализация концепции Индустрия 4.0.

Также одной из самых важных функций сетей 2030 должна стать децентрализация сети, что должно уменьшить цифровой разрыв между территориями и даст новые возможности для цифровой экономики [18].

Таким образом, перспективы развития сетей связи достаточно широки. Поэтому далее рассмотрим необходимость использования данных сетей для роботов в различных областях деятельности человека.

1.4 Четвертая промышленная революция

Описанные выше технологии возникли и развиваются не случайно. Они занимают свое законное место среди прочих перспективных и наукоемких технологий таких, как Интернет вещей, искусственный интеллект, виртуальная и дополненная реальность, робототехника, технологии распределенного реестра

(блокчейн) и т.д., появление и внедрение которых получило название четвертой промышленной революции. [19, 20].

Для того, чтобы новые технологии дали огромные преимущества экономике и обществу, необходимо правильно воспользоваться их потенциалом. То есть, правильно и справедливо распределять блага промышленной революции, контролировать все риски и последствия, а реализация технологий должна происходить в интересах человека и под его контролем [19].

И одними из главных основ дальнейшего технического прогресса являются роботы и робототехника. Так как именно роботы смогут заменить людей на выполнении опасных, вредных, монотонных, требующих высокой точности, работах, значительно повысить производительность труда, качество изготавливаемой продукции и выполняемых работ, а также снизить стоимость продукции и услуг [20].

Согласно классификации Международной организации по стандартизации, роботы подразделяются на промышленных и сервисных. Под промышленным роботом понимается программируемый манипулятор по работе со станками используемых в производственном процессе. Сервисный робот – это робот, который выполняет различные полезные задачи для людей или оборудования, исключая приложения промышленной автоматизации [21].

Промышленный робот необходим для выполнения таких функций на производстве, как перенос предметов или материалов, обслуживание станков по загрузке и разгрузке, сварка, литье, распыление покрытий, штамповка, сборка, контроль качества продукции и т.д. [22].

Опираясь на данные из открытых источников [23, 24] объёмы мирового рынка промышленной робототехники, а также ежегодные поставки различных типов промышленных роботов за последние несколько лет постоянно увеличивались, что говорит о сохранении данной тенденции на ближайшие годы (рис.2 и 3) [20].

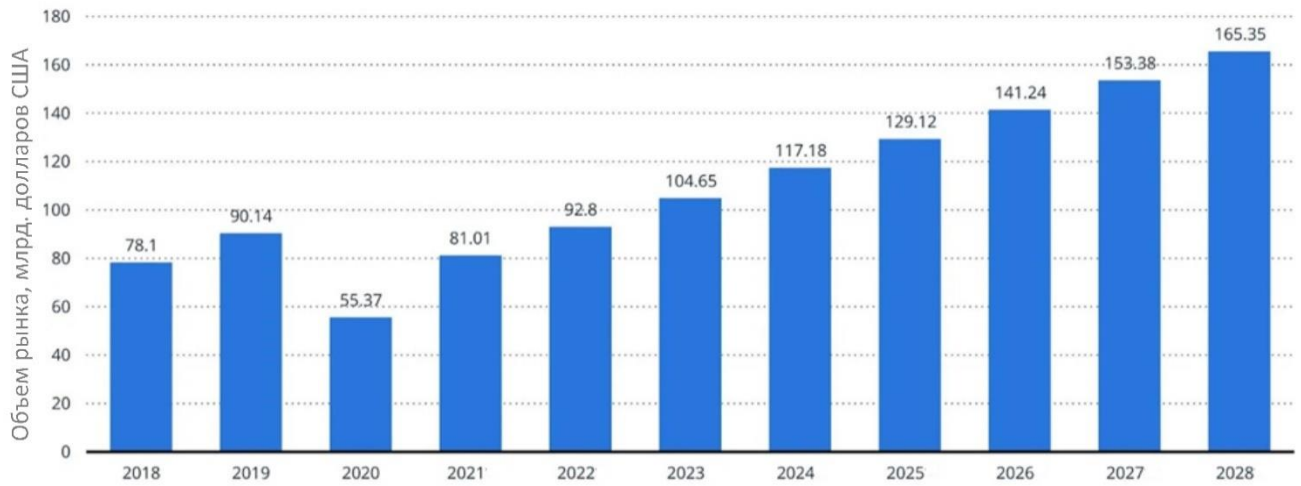


Рисунок 2 – Объем мирового рынка промышленных роботов

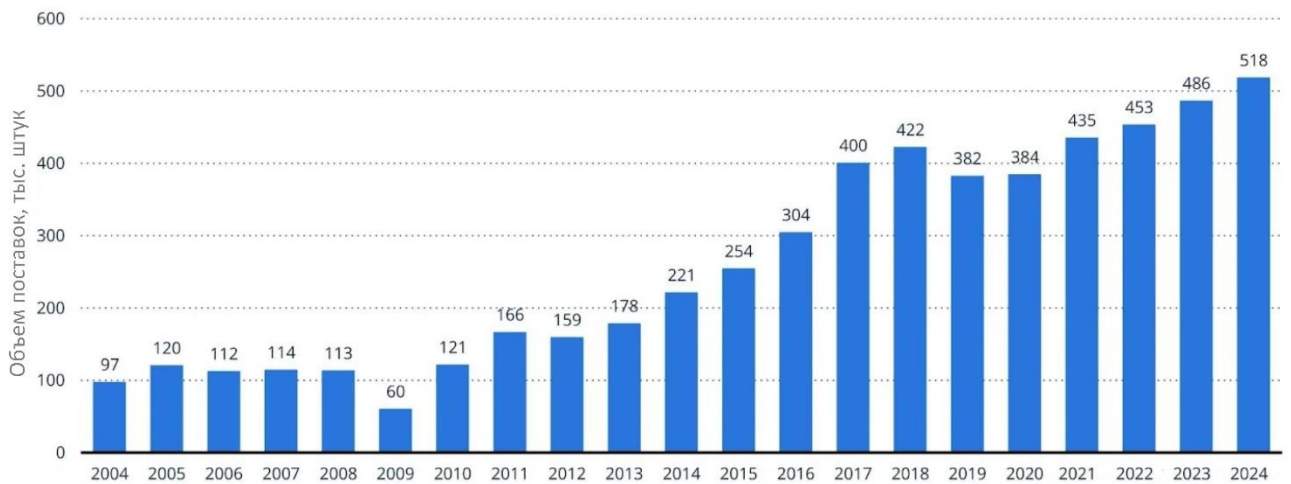


Рисунок 3 – Объем мировых поставок промышленных роботов

Развитие робототехники приводит к появлению множества технических систем, способных выполнять свои функции в различных областях деятельности человека [25]. По данным источника «International Federation on Robotics» рост численности парка промышленных роботов за пять лет составил около 14%. Статистика роста численности промышленных роботов приведена на рисунке 4.

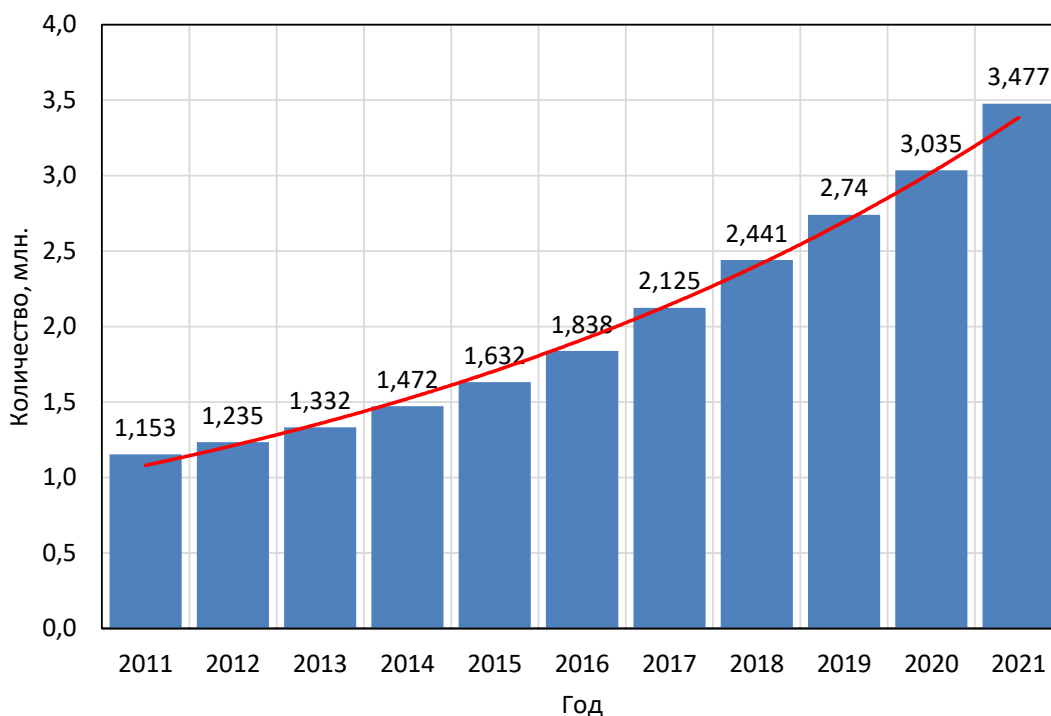


Рисунок 4 – Статистика роста численности промышленных роботов

Таким образом, промышленные роботы играют важную роль в современной промышленности, и это видно по активной фазе роста численности роботов за 10 лет (рис.4), что позволяет предположить сохранение данной тенденции в будущем.

Одним из основных преимуществ использования промышленных роботов в сетях будущего поколения является повышение производительности и эффективности процессов производства. Роботы могут выполнять сложные и рутинные задачи с большей точностью и скоростью, чем человек, что позволяет сократить время производства и улучшить качество продукции. Более того, роботы могут работать круглосуточно без необходимости отдыха, что позволяет увеличить производительность предприятия. А большая емкость в современных сетях позволяет подключить большое количество роботов одновременно.

Сервисные роботы могут работать автономно (без активного участия человека), и частично автономно (с взаимодействием человека и робота). Применение таких роботов широко распространено. Например, существуют роботы, которые оказывают различного рода услуги, взаимодействуя, общаясь с

человеком; бытовые роботы – помогают с работой по дому (мытьё полов, окон, стрижка газонов и т.д.); научные роботы – выполняют повторяющиеся задачи необходимые для научного исследования, а также могут проводить сами эксперименты; медицинские роботы – являются помощниками во время проведения операций и многие другие [21, 2222]. Данные роботы позволят облегчить жизнь человеку в повседневной рутине.

ССОП будущего поколения также предоставят возможность для более гибкого использования роботов, в том числе промышленных. Благодаря IoT роботы смогут быть подключены к облаку и обмениваться данными с другими устройствами и системами. Это позволит роботам получать информацию о текущем состоянии пространства окружения, решаемых задачах, анализировать ее и принимать решения на основе полученных данных. Такая автоматизация процессов позволит предприятиям и пользователям быстро реагировать на изменения условий в той или иной среде и оптимизировать свою деятельность.

Высокая пропускная способность и низкая задержка в сетях обеспечат более быструю и эффективную передачу данных между роботами и централизованными системами. Также это позволит роботам работать в режиме реального времени, что особенно важно для таких задач, как автономное управление роботами или оперативная передача данных о решаемых задачах. Более надежное и быстрое соединение также поможет предотвратить задержки и сбои в работе роботов.

Кроме того, использование роботов на производстве и в быту может снизить риски для человека. Роботы могут выполнять опасные задачи, такие как работа с ядовитыми веществами или высотные работы, что поможет уменьшить число несчастных случаев. Работники и другие пользователи смогут сосредоточиться на более сложных задачах, требующих креативности и интеллектуальных способностей.

Однако, использование роботов в сетях будущего поколения может вызвать определенные сложности при построении и эксплуатации сети, при обеспечении требований по качеству обслуживания и качеству восприятия. В целом, сети

будущего поколения должны предоставить новые возможности для эффективного использования роботов.

1.5 Требования к задержкам и вероятности безотказной работы

Основным критерием отнесения услуг телеприсутствия к услугам сетей связи с ультрамалыми задержками является значение круговой задержки в диапазоне от 1 мс до 10 мс включительно [26].

Более жесткие требования по задержке предъявляются для удаленного управления роботами. Поскольку в таких системах роботы работают под управлением человека или другого робота через сеть, то себя проявляет концепция Тактильного Интернета. В соответствии с версией стандарта 3GPP (Third Generation Partnership Project) TS22.261 [27] для удаленного управления роботами с высокой подвижностью до 50 км/час круговая задержка должна составлять от 1 мс до 20 мс. Важно отметить, что эти показатели должны выполняться при удаленном управлении на площади не более, чем 1 км². Требования по 1 мс для удаленного управления роботами были экспериментально подтверждены на модельной сети услуг телеприсутствия для существенно больших расстояний при значении задержки в 1 мс.

При создании сетей связи шестого поколения и сетей связи 2030 предполагается предоставление существенно более широкого спектра услуг телеприсутствия, чем это возможно в настоящее время. Для оказания таких услуг рассматриваются скорости от 2 Гбит/с до 2 Тбит/с и более [28]. Такие услуги будут одними из основных при реализации цифровой медицины и Индустрии 4.0. Круговые задержки должны быть в единицы миллисекунд, а возможно в 6G и сетях 2030 еще и меньше [29].

В таблице 1 приведены требования по задержкам и вероятности безотказной работы для первого набора услуг телеприсутствия [30].

Таблица 1 - Требования по задержкам и вероятности безотказной работы для первого набора услуг телеприсутствия

№ п/п	Услуга телеприсутствия первого набора	Задержка, мс	Вероятность безотказной работы	Примечание
1	Телеконференции.	320 мс для видео 280 мс для аудио	0,99999	[31]
2	Голографические изображения с использованием вентиляторов и гибридных очков дополненной реальности и голографии.	5 мс	0,999999	[27]
3	Дополненная реальность для медицины, промышленности и образования.	5 мс	0,999999	[32]
4	Роботы-аватары на базе перчаток и искусственных рук для выполнения хозяйственной деятельности человека в неблагоприятных условиях внешней среды и при дистанционном уходе за нуждающимися в этом людьми и животными.	1 мс	0,999999	[27]
5	Роботы-манипуляторы и их сообщества для дистанционного управления при выполнении различных задач в хозяйственной деятельности.	1 мс	0,999999	[27]

В [33] определены значения задержки, которые возникают на физическом уровне при использовании волоконно-оптических систем передачи. Эта величина составляет 5 мкс на километр, и именно она ограничивает расстояния, на которых могут быть оказаны услуги сетей связи с ультрамалыми задержками.

Среди первого набора услуг телеприсутствия преобладают услуги со значениями задержки в 1 мс и в 5 мс. Ограничения по расстоянию представляют собой круги радиусом 50 км и 250 км соответственно. Так как магистральная сеть построена на базе волоконно-оптических линий связи, следует учитывать уменьшение радиуса оказания услуг за счет неравномерности этих структур.

С учетом изложенного требуется исследовать характеристики плотности населения, расстояний между населенными пунктами, валового регионального продукта для оценки возможности повсеместного внедрения первого набора услуг телеприсутствия либо целиком, либо в ограниченном виде.

Проблемы внедрения услуг сетей связи с ультрамалыми задержками, к которым относится первый набор услуг телеприсутствия, в настоящее время послужили основой для создания новых технологий для обеспечения оказания таких услуг на сетях связи пятого и последующих поколений [30].

1.6 Требования к характеристикам качества обслуживания в сетях связи с ультрамалыми задержками

В центре внимания исследований, проведенных в диссертационной работе, находятся роботы-манипуляторы, взаимодействующие с сетью связи и управляемые дистанционно через сеть. Такое взаимодействие относится к услугам телеприсутствия, исследования в области которых являются одними из наиболее актуальных в настоящее время.

Проблемы качества обслуживания при предоставлении услуг телеприсутствия связаны прежде всего с тем, что для обеспечения требований для

таких услуг необходимо использовать сети связи с ультрамалыми задержками. Сети связи с ультрамалыми задержками появились как новый класс сетей и стали предметом интенсивных исследований на основе концепции Тактильного Интернета, которая как раз и подразумевает для обеспечения предоставления услуг Тактильного Интернета задержку величиной в 1 мс [10, 34, 35, 36].

Впоследствии эта концепция получила свое развитие в создании сверхнадежных взаимодействий с ультрамалыми задержками uRLLC (ultra Reliable Low Latency Communications) и соответствующих сетей [11, 17, 37]. Следует сразу же отметить, что при этом была предпринята попытка несколько смягчить требования Тактильного Интернета и диапазон возможных значений задержки для различных приложений uRLLC был расширен и составляет теперь от 1 до 10 мс [38].

Естественно, что такое направление развития сетей связи на могло остаться вне пристального внимания международных стандартизирующих организаций и был разработан ряд стандартов по нормированию задержек для услуг Тактильного Интернета и uRLLC, которые будут далее использоваться как базовые в диссертационной работе [33, 39, 40].

Сектор стандартизации телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) для услуги Тактильного Интернета как одной из услуг телеприсутствия нормировал значение круговой задержки величиной в 1 мс [38]. В основе этой нормы находится известное значение задержки на физическом уровне при использовании волоконно-оптических систем передачи, вызванное фундаментальными ограничениями по скорости передачи света, и составляющее 5 мкс на один километр [33].

В стандарте Европейского института по стандартизации телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standard Institute) [39] появились требования к мобильным роботам, для которых задержка была нормирована величиной в 1-2 мс при скорости перемещения робота не более 50 км/час. Этот стандарт был основан на стандарте 3GPP от 2019 года [40].

Для исследований, проводимых в диссертационной работе, наибольший интерес вызывает новая версия стандарта 3GPP от 2022 года [27], в которой стандартизация для робототехники, взаимодействующей с сетями связи, существенно расширена. Для мобильных роботов значение задержки величиной в 1-2 мс при скорости перемещения робота сохранено. При этом введены несколько значений задержки для стационарных роботов.

Значения задержки для стационарных роботов приведены в пределах от 20 мс до 100 мс без деления на различные функциональные задачи роботов. При этом отмечается, что если робот использует сенсорную информацию, то значение задержки должно составлять не более 5 мс.

Все вышесказанное еще раз подчеркивает актуальность исследования вопросов качества обслуживания для роботов, в том числе с учетом их функционального назначения. Как видим, задачи по определению характеристик трафика и параметров качества обслуживания для роботов-манипуляторов актуальны, в том числе и по причине недостаточно определенных параметрах трафика и качества обслуживания в международных стандартизирующих организациях.

1.7 Выводы по главе

По содержанию главы можно сделать следующие выводы:

1. Произведен анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений. Определено, что Тактильный Интернет является предпосылкой для создания сетей связи с ультрамалыми задержками в рамках сетей связи шестого поколения, поскольку с переходом к таким сетям изменятся характеристики плотности устройств сети и круговой задержки. Такие сети обеспечат высокоскоростной и надежный доступ к данным, большую емкость и гибкость использования. Услуги телеприсутствия, в свою очередь, создают трафик,

который должен быть обслужен с требуемыми характеристиками качества обслуживания.

2. Рассмотрена четвертая промышленная революция в рамках одной из главных основ технического прогресса – роботов. Их использование широко распространено на сегодняшний день на производствах, в повседневной жизни человека, при проведении научных исследований, в медицине и т.д. Они необходимы для повышения производительности и эффективности процессов производства и для выполнения рутинной работы человека в быту. Главной задачей является их управление через сеть и использование в режиме реального времени.

3. В результате проведенного анализа международных стандартов определены требования к задержкам и вероятности безотказной работы для различных услуг телеприсутствия, а также требования к характеристикам качества обслуживания в сетях связи с ультрамалыми задержками.

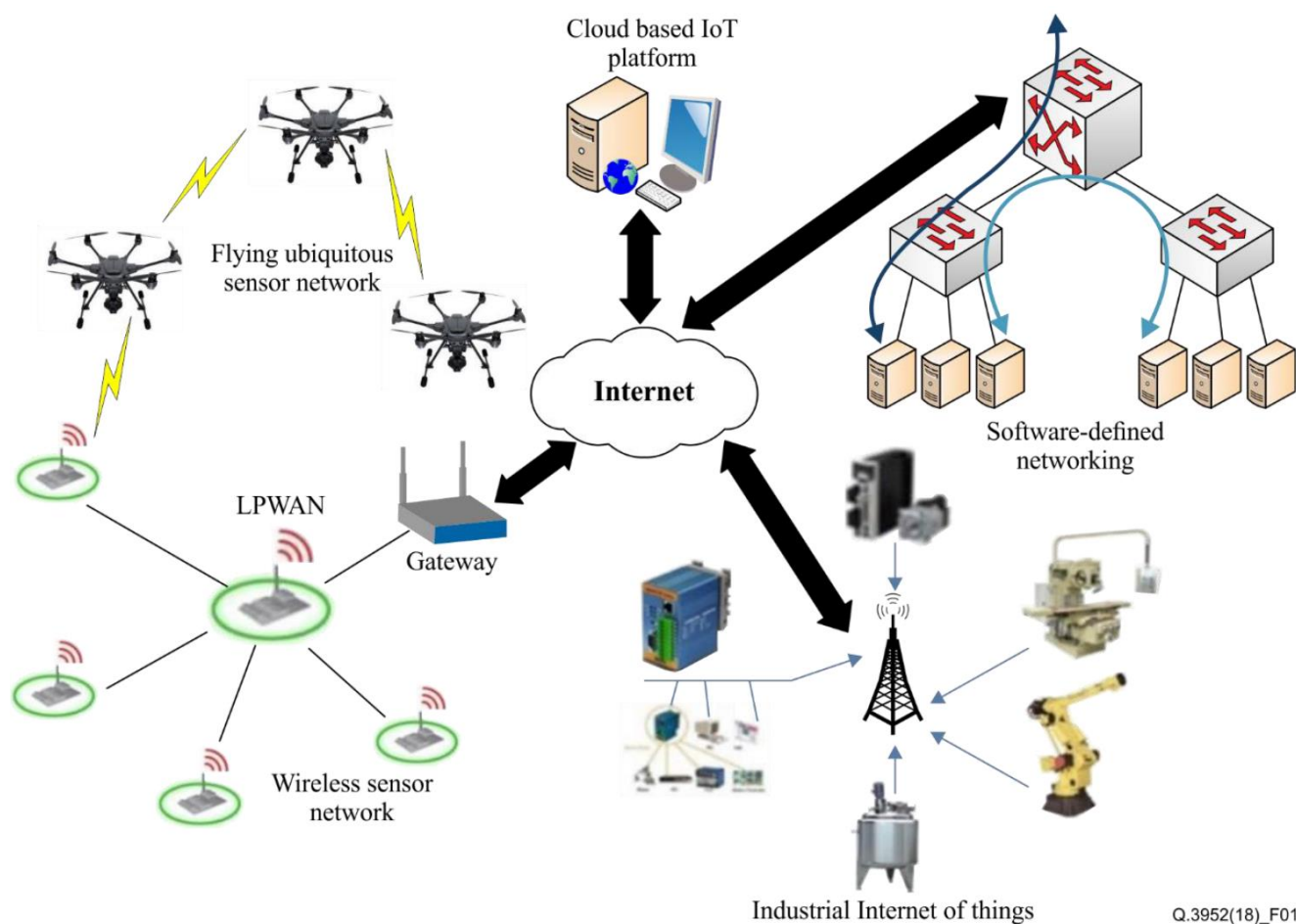
ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТАКТИЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОВ- МАНИПУЛЯТОРОВ

2.1 Модельные сети и области их применения

Для тестирования телекоммуникационного оборудования или программного обеспечения (далее – ПО), различных систем или сетевых сервисов используются модельные сети [41]. Они применяются для проведения различных научных исследований с целью изучения уже существующих систем связи и для внедрения новых научно-технических решений [42].

Согласно рекомендации ITU-T Q.3900 [43], под термином модельная сеть понимается сеть, которая имитирует возможности, аналогичные существующим в действующих телекоммуникационных сетях, имеет подобную архитектуру и обладает теми же функциональными возможностями, а также использует те же технические средства связи.

Структуру и компоненты модельной сети необходимо постоянно адаптировать под особенности текущего поколения оборудования и технических систем ССОП [44]. Так, например, типовая структура модельной сети для тестирования телекоммуникационного оборудования, в т.ч. оборудования Интернета вещей, описанная в рекомендации ITU-T Q.3952 [45], представлена на рисунке 5. Она включает в себя несколько сегментов: облачную платформу IoT, сегмент летающих всепроникающих сенсорных сетей, сегмент беспроводной сенсорной сети, сегмент Индустриального Интернета вещей, сегмент программно-конфигурируемой сети SDN.



Q.3952(18)_F01

Рисунок 5 – Типовая структура модельной сети

Таким образом, в настоящий момент в связи с реализацией сетей 5G/IMT-2020 возникла необходимость в создании модельных сети для сетей связи с ультрамалыми задержками. Однако, из-за вмешательства в эволюционный процесс пандемии COVID-19 [46], необходимым стало учитывать требования и для услуг телеприсутствия.

Структура такой модельной сети, подробно описанная в рекомендации ITU-T Q.4065 [47], представлена на рисунке 6.

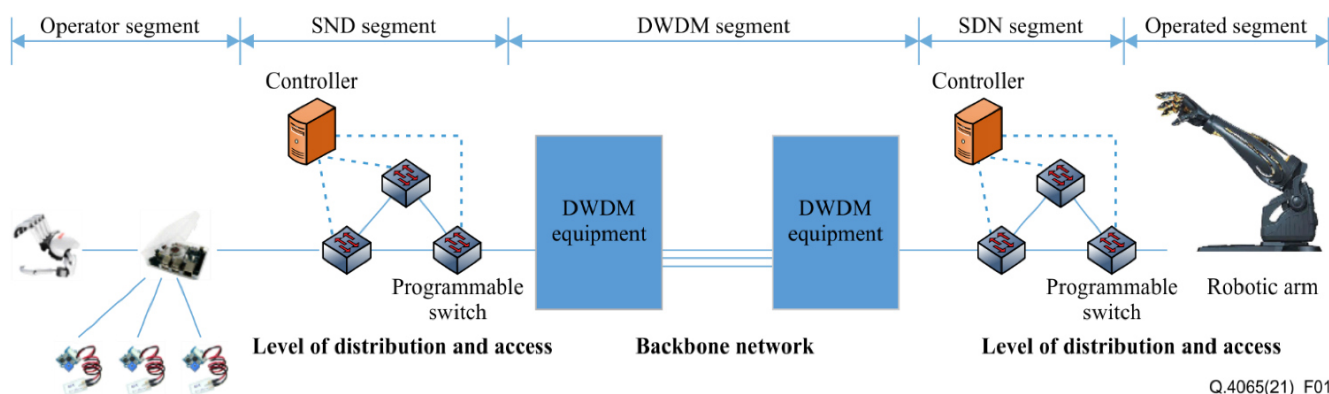


Рисунок 6 – Типовая структура модельной сети для Тактильного интернета

2.2 Первоочередной набор услуг телеприсутствия

В первоочередной набор услуг телеприсутствия для внедрения на сетях связи были включены следующие услуги [30]:

- телеконференции;
- голографические изображения с использованием вентиляторов и гибридных очков дополненной реальности и голографии;
- дополненная реальность для медицины, промышленности и образования;
- роботы-аватары на базе перчаток и искусственных рук для выполнения хозяйственной деятельности человека в неблагоприятных условиях внешней среды и при дистанционном уходе за нуждающимися в этом людьми и животными;
- роботы-манипуляторы и их сообщества для дистанционного управления при выполнении различных задач в хозяйственной деятельности.

Для реализации таких услуг на сетях связи требуется различный уровень развития сетей связи общего пользования, определяемый, в основном, требуемыми значениями круговой задержки для предоставления тех или иных услуг телеприсутствия.

2.3 Реализация модельной сети

Так на кафедре сетей связи и передачи данных в СПб ГУТ была создана модельная сеть нового поколения в области услуг телеприсутствия, представленная на рисунке 7 [1, 30]. Модельная сеть нового поколения предназначена для исследований, обучения и тестирования в области услуг телеприсутствия.

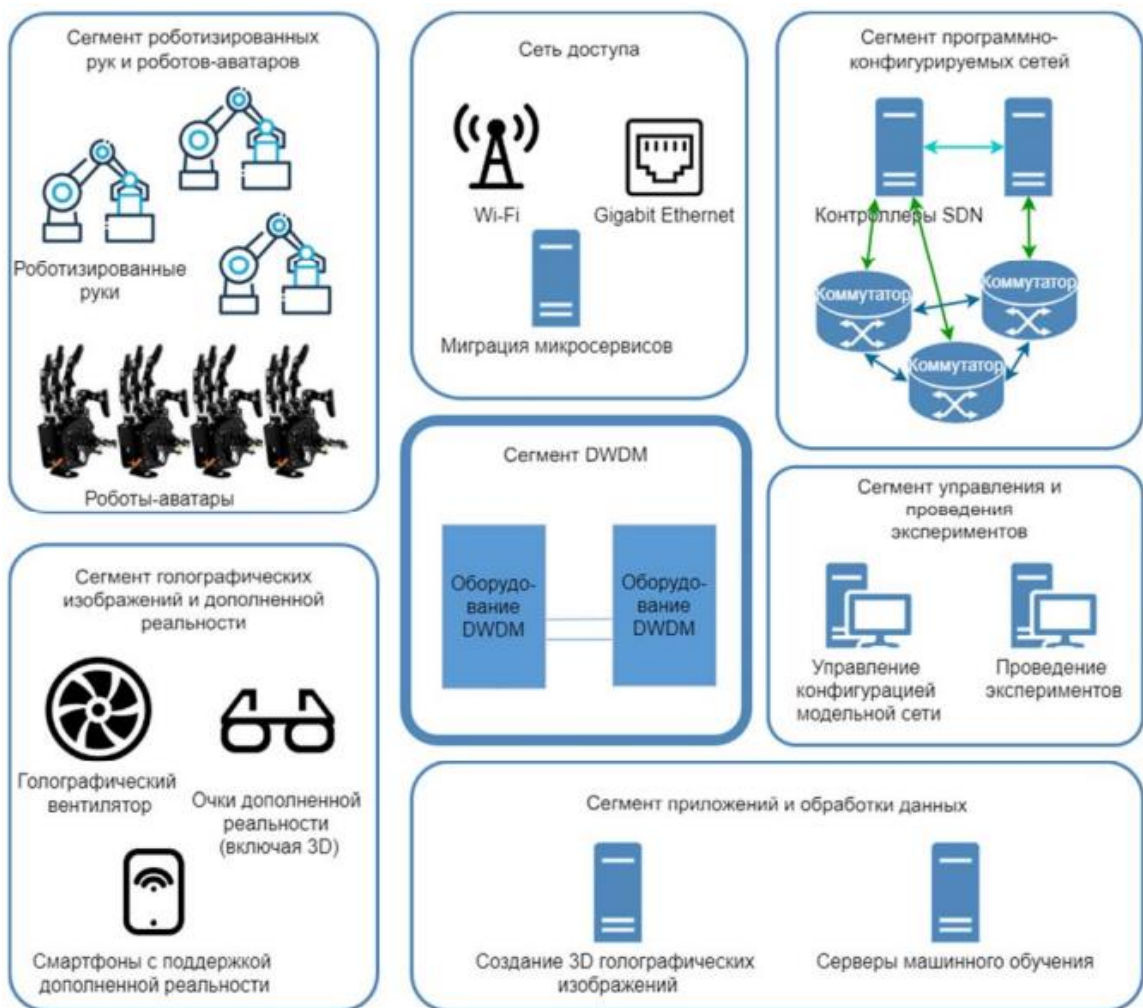


Рисунок 7 – Модельная сеть в области услуг телеприсутствия

Данная архитектура сети может дополняться и изменяться, основываясь на дальнейших результатах исследований сети и услуг 2030 [9]. На сегодняшний день она состоит из семи сегментов [30]:

1) Ядро модельной сети на базе российского оборудования DWDM производства Т8 [1]. Ядро является важнейшей частью модельной сети, так как от него зависит возможность предоставления услуг телеприсутствия, поскольку для передачи трехмерных голографических изображений с соответствующим качеством может потребоваться пропускная способность в Тбит/с [48].

2) Сегмент роботов-манипуляторов и роботов-аватаров включает в себя роботов-манипуляторов с сетевым управлением, а также роботов-аватаров, которые с добавлением AR и голографических устройств представляют собой рой робо-устройств.

3) Сегмент голографических изображений и дополненной реальности состоит из голографических вентиляторов, AR-очков и смартфонов с поддержкой AR. Некоторые очки AR поддерживают 3D или пространственную дополненную реальность, что позволяет создать систему онлайн-трансляции и отображения 3D-видео.

4) Сегмент SDN состоит из коммутаторов и контроллеров OpenFlow. Этот сегмент позволяет проводить исследования на сетевом уровне.

5) Сеть доступа представлена технологиями Gigabit Ethernet и Wi-Fi 6 и может быть дополнена Bluetooth, LoRa и т.д.

6) Сегмент контроля, испытаний и измерений состоит из рабочих станций, позволяющих конфигурировать модельное сетевое оборудование, осуществлять его мониторинг и производить необходимые для исследования измерения.

7) Сегмент приложений и обработки данных позволяет создавать 3D-видеоизображения для голографических и AR-приложений, а также использовать возможности машинного обучения для создания приложений для роботов-аватаров и роботов-манипуляторов.

2.4 Компоненты модельной сети сегмента роботов-манипуляторов

В диссертационной работе исследуется предоставление услуги телеприсутствия из первоочередного набора для роботов-манипуляторов. В контексте главы будут рассмотрены компоненты модельной сети, которые необходимы для проведения исследований с использованием робота-манипулятора.

Роботы-манипуляторы нужны для решения задач удаленного взаимодействия с окружающими предметами или людьми, т.е. использование таких роботов делает деятельность человека более эффективной. Робот-манипулятор применим в различных областях, например, в сельском хозяйстве, промышленности, здравоохранении, логистике. В каждой области важна точность, правильность и своевременность выполнения функции роботом [49].

Основной задачей становится управление роботом дистанционно через сеть. Необходимо изучить с какой скоростью будет реагировать робот на изменение команды через сеть, какие могут возникнуть задержки и потери в сети, и как они отразятся на выполнении манипуляций роботом. Кроме того, при появлении роя роботов и их функциональном совершенствовании возникнет необходимость в их централизованном управлении. Отсюда появляются дополнительные вопросы для исследования, например, как в сети будет происходить распределение функций для роботов, что будет при выходе из строя одного или нескольких роботов [49].

2.5 Многофункциональный робот-манипулятор Dobot Magician

Одним из основных компонентов модельной сети является многофункциональный робот-манипулятор «DOBOT Magician». Он представляет собой небольшой, настольный, портативный, многофункциональный

роботизированный манипулятор, с помощью которого можно проводить исследования, тестирования в области услуг телеприсутствия и робототехники, а также обучаться различным языкам программирования и методам автоматизации производств [20, 50, 51]. Выбор данной модели обусловлен её наличием в составе учебно-лабораторной базы кафедры «Сетей связи и передачи данных».

На рисунке 8 представлен робот-манипулятор DOBOT Magician со сменными инструментами. С его помощью можно реализовать удаленное присутствие человека, и его взаимодействие с окружающей средой [50].



Рисунок 8 – Робот-манипулятор Dobot Magician

Благодаря сменным инструментам в комплекте манипулятора, он может выполнять следующие функции [1, 49]:

- манипулирование предметами – с помощью вакуумного захвата и механического захвата с пневматическим приводом;
- написание текстов и рисование – с помощью держателя ручки;

- выполнение лазерной гравировки – с помощью лазерной насадки;
- выполнение трехмерной печати объектов – с помощью насадки 3D Printer.

Меняя насадку, происходит смена режима работы манипулятора. Однако, работа манипулятора не ограничивается только вышеперечисленными функциями. Данная модель роботизированной платформы имеет 13 дополнительных интерфейсных портов: ввода/вывода данных, коммутационный и для подключения моторов, других модулей, устройств, датчиков, что позволяет расширить задачи работа [49].

Например, имея пять роботов, две конвейерные ленты и рельсу для линейного перемещения робота, есть возможность создать мини-конвейер (рис.9). Также дополнительно можно установить цветовой и инфракрасный датчики, которые будут определять цвет и местоположение предмета для дальнейших манипуляций с ним [49].



Рисунок 9 – Пример мини-конвейер на модельной сети с использованием роботов-манипуляторов и дополнительных устройств

Управлять роботом-манипулятором «Dobot Magician» можно с помощью программы на компьютере или на смартфоне, а также дистанционно через джойстик. В качестве канала связи используются USB кабель, Wi-Fi, Bluetooth. Также манипулятор может распознавать жесты и голосовые команды [52].

Dobot Magician совместим с гибкой платформой для разработки ПО роботов - ROS (Robot Operating System) [53], и с микроконтроллерами Arduino [54]. Для установки приложения «DobotStudio» необходимо наличие ОС Windows 7 и выше. Фрагмент рабочего окна приложения представлен на рисунке 10. В основном окне видны: кнопка подключения/ отключения с роботом, выбор инструмента, меню настроек, кнопка исходного положения манипулятора и экстренной остановки его работы, выбор режима работы робота, и панель манипулирования роботом.

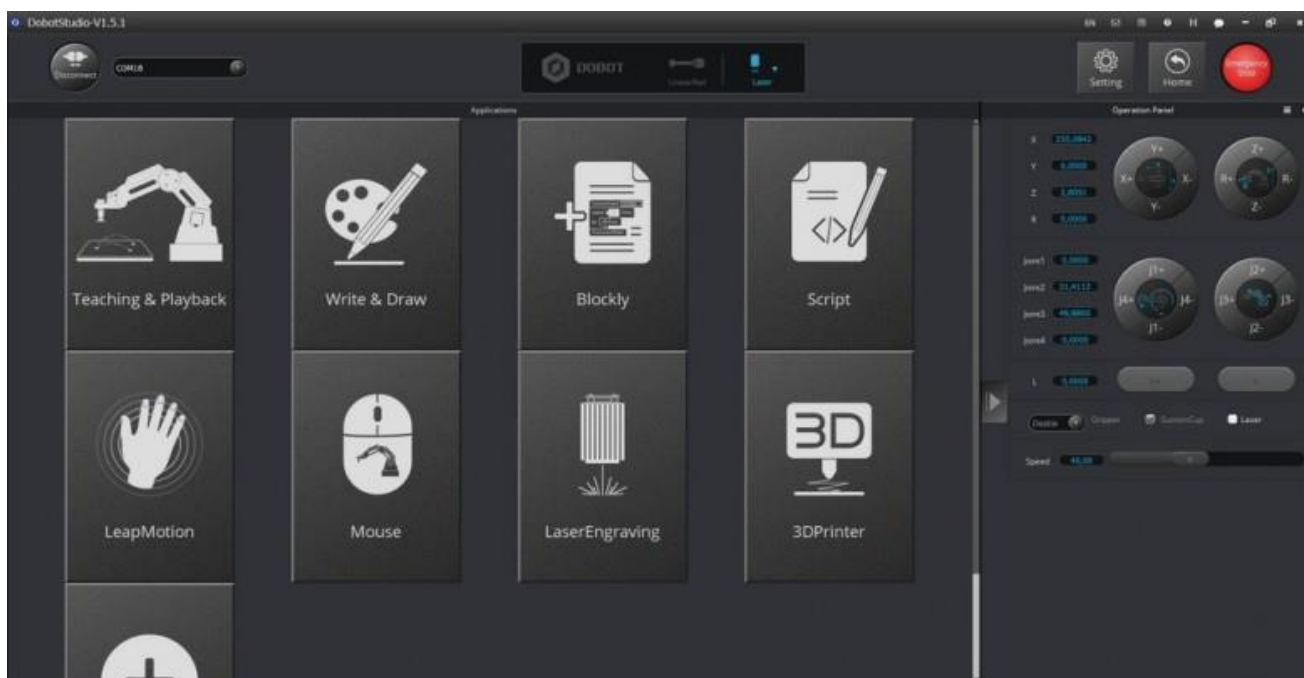


Рисунок 10 – Фрагмент рабочего окна программы DobotStudio

Управлять роботом-манипулятором можно тремя способами [49, 52, 54]:

1. Teaching & Playback – обучение и повторение (рис.11). В данном режиме манипулятору настраивают вручную команды и задают цикличное повторение. Настройка команд вручную может производиться двумя способами: с помощью панели манипулирования (перемещая инструмент по осям в нужное положение, и сохраняя его координаты с помощью кнопки «+Point»), или с помощью кнопки «снятия тока удержания» на самом манипуляторе (при отпускании кнопки, координаты автоматически записываются в программу).

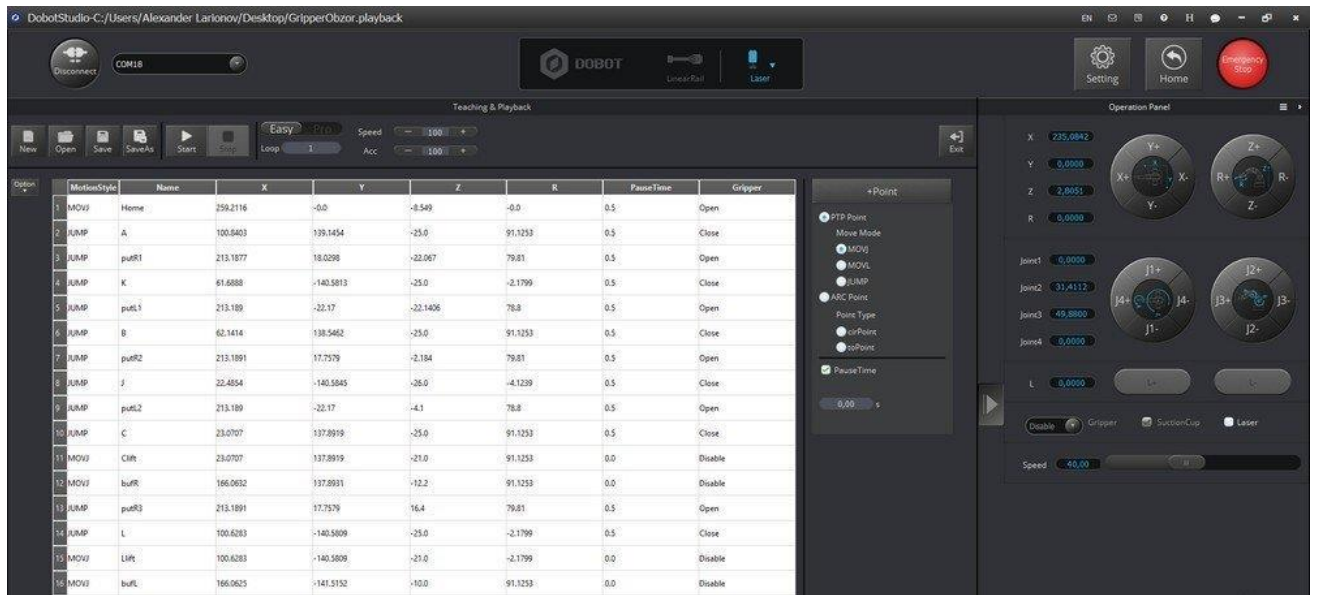


Рисунок 11 – Фрагмент рабочего окна программы на вкладке «Обучение и повторение»

2. Blockly - блочное программирование (рис.12). Такой режим управления удобен для начинающих программистов. Он позволяет создавать сложные программы, с добавлением различных условий, но из предложенных программой блоков.

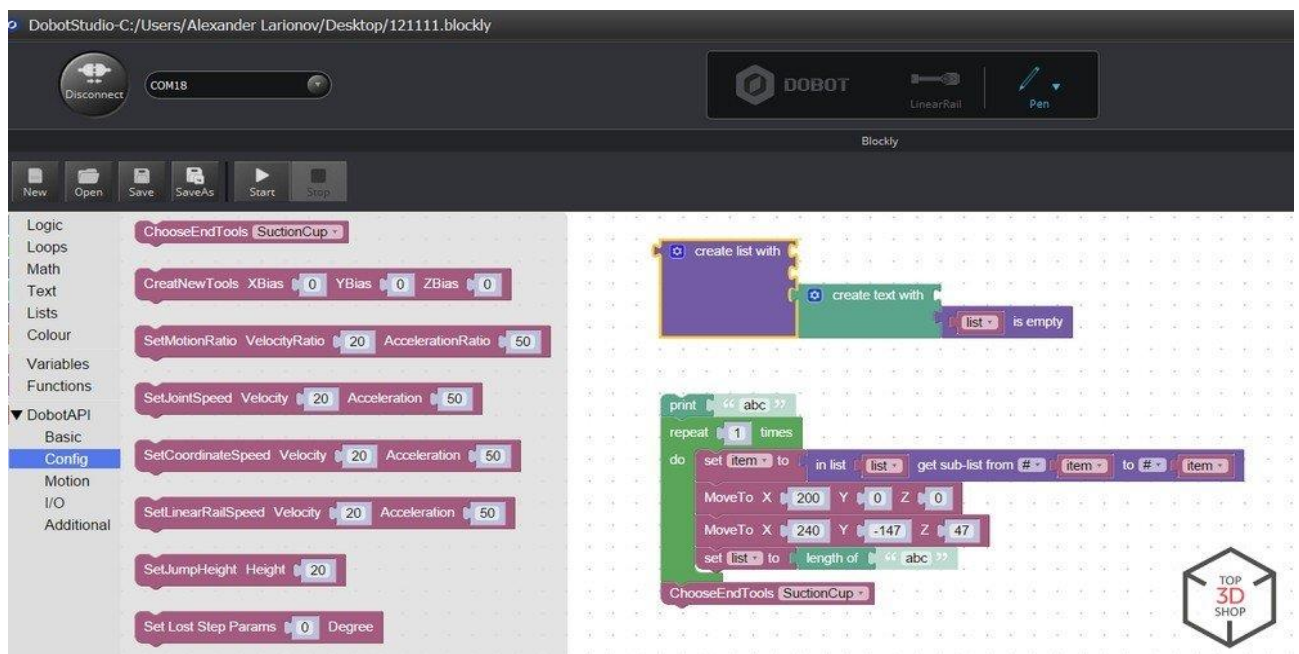


Рисунок 12 – Фрагмент рабочего окна программы на вкладке «Блочное программирование»

Каждый блок отвечает за различные действия, например, прописывает условия, циклы, функции, математические преобразования и т.д. Сама программа записывается путем необходимого выстраивания блоков и изменением координат. И в итоге, можно увидеть уже готовый прописанный код на Python, что в дальнейшем поможет в написании более сложного скрипта.

3. Script – скрипт (рис.13). Dobot Magician понимает более 20-ти языков программирования, включая наиболее распространенные сегодня Python, Java, C/C++/C# и другие. Здесь можно создавать различные алгоритмы поведения манипулятора и устройств, практически без ограничений. Это дает безграничные возможности для разработчиков.



Рисунок 13 – Фрагмент рабочего окна программы на вкладке «Скрипт»

Также робот-манипулятор Dobot Magician поддерживает следующие режимы работы [49]:

– Write & Draw – написание и рисование (рис.14). Установив в качестве инструмента – ручку, можно писать любой текст, нарисовать свой рисунок или добавить рисунок из встроенной библиотеки. Все контуры воспроизводятся с высокой точностью.

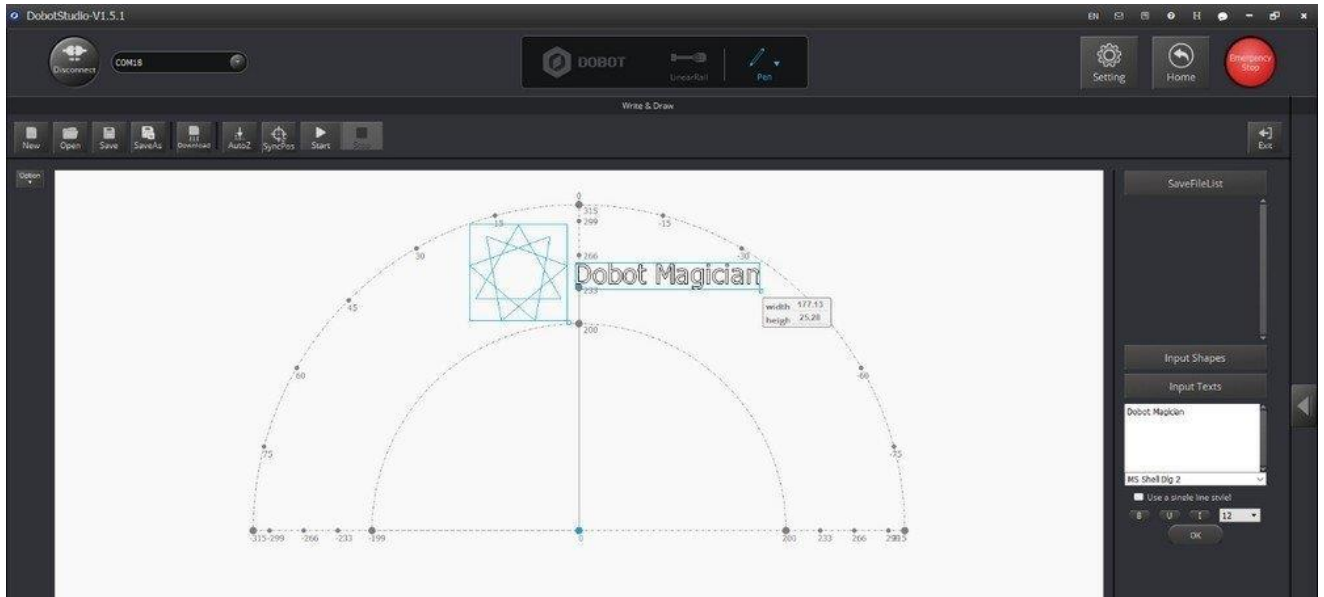


Рисунок 14 – Фрагмент рабочего окна программы на вкладке «Написание и рисование»

– Mouse – компьютерная мышь (рис.15). Использование компьютерной мыши необходимо для оценки максимально возможной области перемещения инструмента.

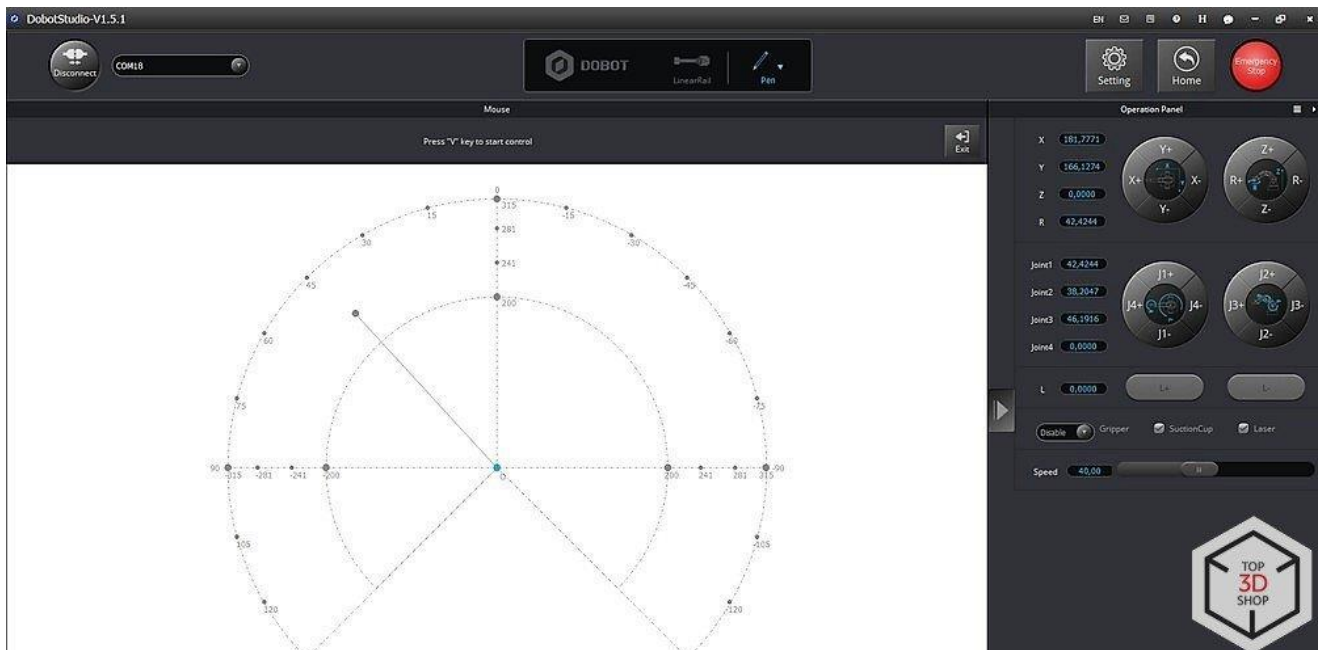


Рисунок 15 – Фрагмент рабочего окна программы на вкладке «Компьютерная мышь»

– Laser Engraving – лазерная гравировка. Гравировку можно делать на таких материалах, как кожа, дерево, картон, бумага, акрил. В настройках устанавливается мощность, скорость и ускорение.

– 3D Printer – 3D печать. При трехмерной печати, необходимо поменять прошивку. И в открывшемся окне программы Repitier Host, производятся настройки для дальнейшей печати.

– Leap Motion – скачкообразное движение. С помощью данной технологии возможно управлять манипулятором жестами.

В приложении на смартфоне ограниченный функционал Рисунок 16(рис.16), поэтому взаимодействовать с манипулятором можно в режимах рисования и гравировки. Очень удобным представляется взаимодействовать с манипулятором, например, удаленно подписывая документы.

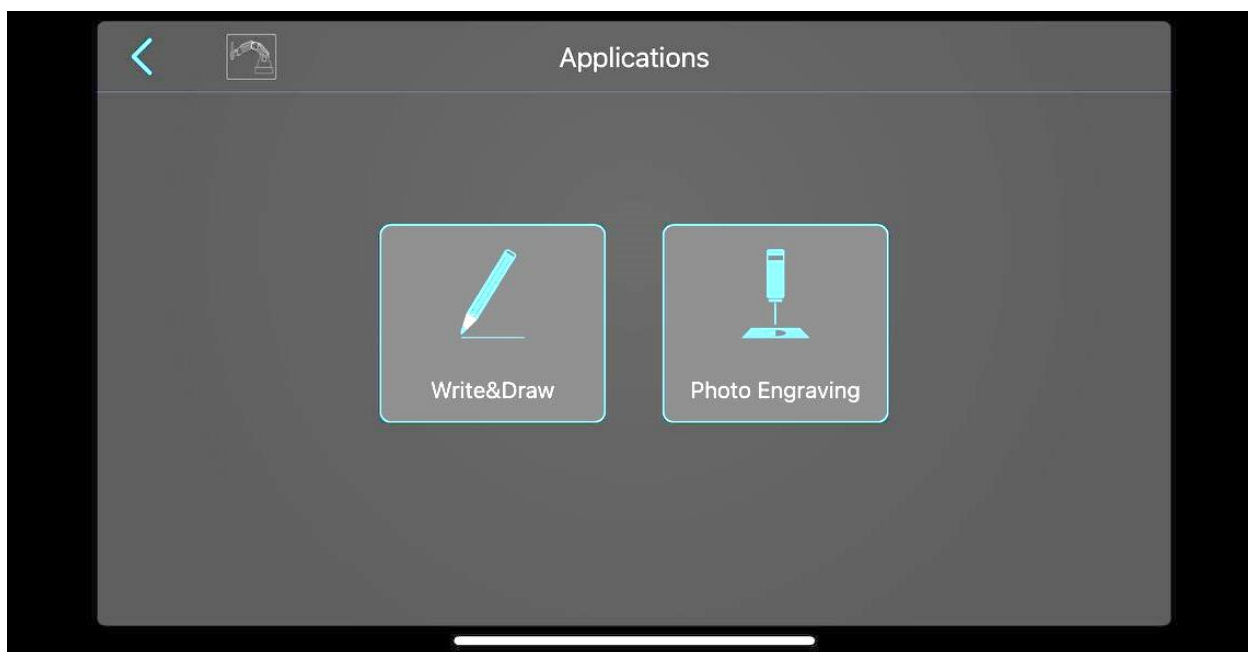


Рисунок 16 – Фрагмент рабочего окна программы на смартфоне

Манипулятор приводится в движение тремя шаговыми двигателями, которые оснащены датчиками обратной связи и редукторами. Серводвигатель выступает в роли четвертой оси робота, на нем крепится вакуумный или механический захват. На рисунке 17 представлена рабочая зона манипулятора, а в таблице 2 - диапазон и максимальная скорость движения по осям.

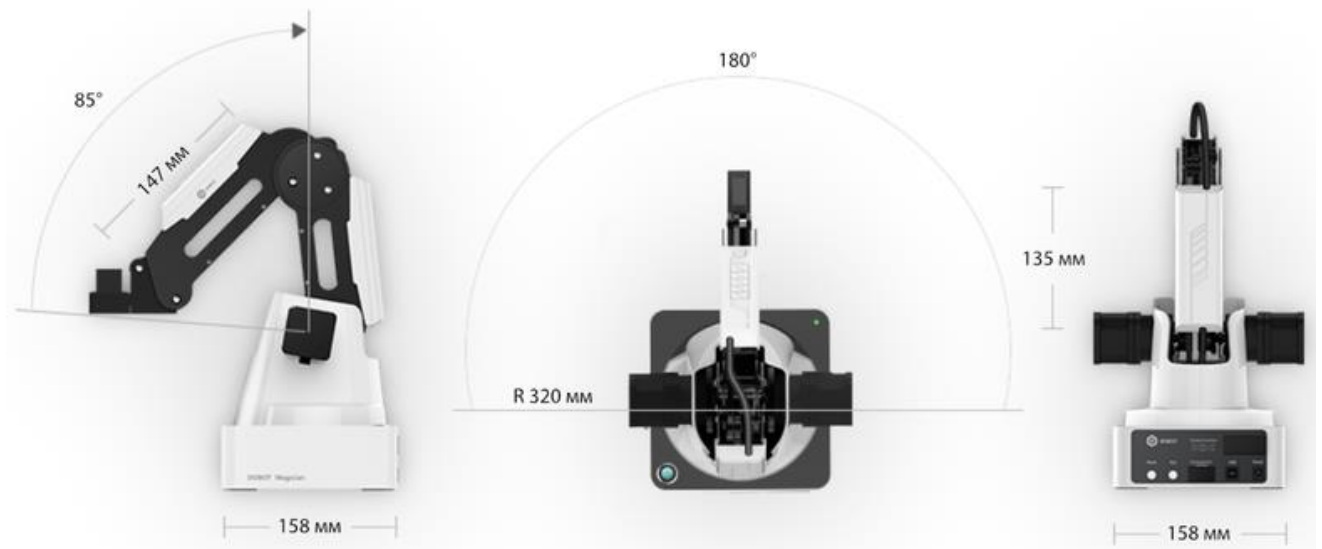


Рисунок 17 – Рабочая зона манипулятора

Таблица 2 – Характеристики осевого движения

Ось	Диапазон	Максимальная скорость (рабочая нагрузка 250 г)
Соединение 1 – база	$-120^{\circ} \sim +120^{\circ}$	320°/с
Соединение 2 – задний рычаг	$-5^{\circ} \sim +90^{\circ}$	320°/с
Соединение 3 – передний рычаг	$-15^{\circ} \sim +90^{\circ}$	320°/с
Соединение 4 – поворотный серводвигатель	$-140^{\circ} \sim +140^{\circ}$	480°/с

Основные технические характеристики робота-манипулятора можно представить в виде таблицы 3 [20].

Таблица 3 – Технические характеристики робота-манипулятора «DOBOT Magician»

Характеристика	Значение
Количество осей	4
Полезная нагрузка	500 г
Макс. дальность (радиус)	320 мм
Повторяемость положения (точность)	0,2 мм
Интерфейсы	USB / Wi-Fi / Bluetooth
Источник питания	100 В – 240 В, 50/60 Гц
Питание	12 В / 6,5 А постоянного тока
Потребление	60 Вт Макс.
Рабочая температура	-10°C – 60°C

Каждый сменный инструмент также имеет свои характеристики (табл.4).

Таблица 4 – Характеристики сменных инструментов

Характеристика	Значение
<i>Вакуумный захват</i>	
Диаметр присоски	20 мм
Давление	-35 кПа
<i>Пневматический захват</i>	
Раскрытие захвата	27,5 мм
Сила	8 Н
Тип привода	пневматический
<i>Держатель ручки</i>	
Диаметр инструмента	10 мм
<i>Лазерная насадка</i>	
Потребляемая мощность	500 мВт
Длина волны	405 нм (синий лазер)
Напряжение	12 В
Триггер	TTL (с драйвером PWM).
<i>Блок FDM 3D-печати</i>	
Максимальный размер печати	150x150x150 мм
Материал печати	PLA
Разрешение	0,1 мм

Основным программным обеспечением является ПО – Dobot Studio, ПО для 3D-печати – Repetier Host, ПО для лазерной гравировки – Grbl Controller 3.6, в качестве редактора визуального языка программирования используется программа Dobot Blockly. Программное обеспечение для разработчиков (SDK – Software Development Kit): протокол связи, библиотека программ Dobot.

2.5.1 DWDM система

Следующим компонентом модельной сети является ядро, которое образуется из магистральных сетей. Магистральная сеть связи – это транспортная телекоммуникационная инфраструктура, которая предоставляет услуги связи. Согласно развитию сетей связи магистральные сети должны обеспечивать высокую пропускную способность, низкие задержки, мультисервисность и надежность. Построение таких сетей строится на волоконно-оптических линиях связи с использованием высокоскоростного или низкоскоростного канального оборудования связи.

Такие системы строятся на основе технологии уплотненного волнового мультиплексирования DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) [55]. И в качестве высокопроизводительного ядра модельной сети для услуг телеприсутствия была выбрана DWDM система на базе отечественной, мультисервисной DWDM-платформы «Волга» (рис.18) производства компании Т8 [56, 57].

Выбор данной платформы основан не только на наличии данного оборудования в составе учебной лаборатории кафедры «Сетей связи и передачи данных», но также курсом партии и правительства на импортозамещение в области телекоммуникаций. Платформа имеет статус телекоммуникационного оборудования российского происхождения (ТОРП), ведомственную сертификацию, находится в реестре инновационной продукции, рекомендованной к закупкам по 223-ФЗ [56].

DWDM-платформа «Волга» исполнена в виде стандартных модулей, которые устанавливаются в 4 типа шасси. Например, 10U шасси рассчитан на 13 блоков, 6U шасси - на 7 блоков, и т.д.



Рисунок 18 – Внешний вид DWDM-платформы «Волга»

В таблице 5 представлены особенности DWDM-платформы «Волга».

Таблица 5 – Особенности DWDM-платформы «Волга»

Характеристики	Значение
<i>Мощность и гибкость</i>	
Форм-фактор	от 1 до 10U
Скорость	от 155 Мбит/с до 800 Гбит/с
Система управления	Операторского класса
<i>Эффективность</i>	
Плотность клиентских интерфейсов	Высокая
Скорость на один слот	До 1.2 Тбит/с
Поддержка технологий	Alien Wavelength
<i>Надежность</i>	
Резервирование блоков управления и питания	1+1, 2+1, 3+1
Система охлаждения	с конструкцией для ЦОД

DWDM-платформа «Волга» необходима для построения высокоскоростных сетей и способна реализовать, в своем исполнении, до 40 каналов с пропускной способностью до 100 Гбит/с каждый. Таким образом, она может обеспечить

суммарную пропускную способность до 4 Тбит/с. На рисунке 19 представлена структура ядра данной модельной сети.

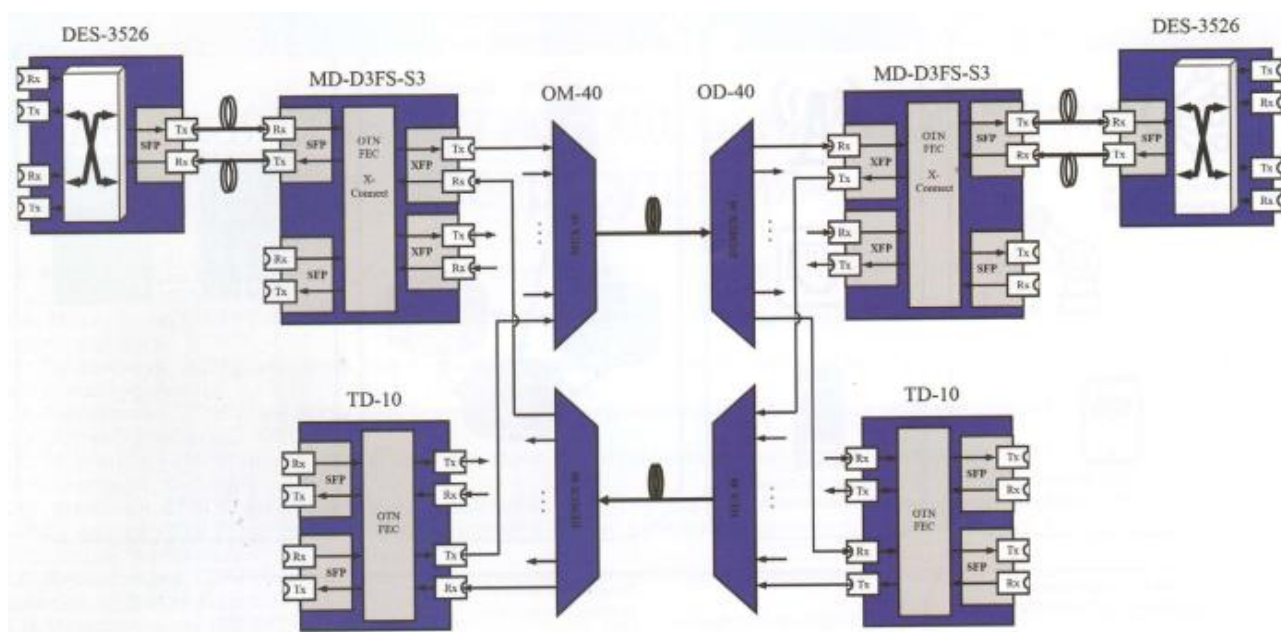


Рисунок 19 – Структура ядра модельной сети

DWDM-платформа состоит из следующих элементов [1]:

1. Оптические мультиплексоры (OM-40) необходимы для группировки отдельных сигналов DWDM-каналов в один спектрально-уплотненный линейный оптический сигнал при мультиплексировании.

2. Оптические демультиплексоры (OD-40) необходимы для разделения одного спектрально-уплотненного линейного оптического сигнала на отдельные сигналы DWDM-каналов при демультиплексировании.

3. Транспондер (TD-10) производит 3R-регенерацию клиентского оптического сигнала 10 Гбит/с и передает его в оптический DWDM-канал на мультиплексор. Сигнал, поступающий с демультиплексора, подвергается обратному преобразованию. В данном транспондере поддерживается передача 1 или 2 клиентских сигнала, и алгоритмы коррекции ошибок не используются.

4. Агрегирующий транспондер (MD-D3FS) производит 3R-регенерацию и передает один клиентский сигнал STM-64 или объединяет два клиентских потока GE, STM-1, либо STM-4 в линейный сигнал OTN OTU1. Агрегирующий

транспондер использует алгоритмы коррекции ошибок FEC G.709 или Super-FEC G.975.

В данной комплектации DWDM-платформа позволяет поддерживать клиентские интерфейсы STM-1, STM-4, GE, STM-16, 10GE, STM-64 и OTU2 [1].

2.5.2 Атенюатор

Для проведения исследований по определению степени влияния затухания в сигнале при передаче команд, между оконечными станциями DWDM системы устанавливается цифровой переменный оптический аттенюатор FHA2S01 (рис.20).



Рисунок 20 – Цифровой переменный оптический аттенюатор FHA2S01

Цифровой оптический аттенюатор необходим для тестирования характеристик волоконно-оптических линий связи, для измерения предельных значений чувствительности оптических приемников. Диапазон затухания данного

прибора от 0 до 80 дБ, с шагом – 0,05 дБ, максимальная входная мощность составляет +24 дБ [58].

Увеличение затухания аттенюатора приводит к возрастанию вероятности ошибки в системе, что, в случае применения протоколов с переспросом, порождает временную задержку, а при использовании протоколов со стиранием – вызывает потерю пакетов [1].

Когда сигнал проходит по каналу связи, его амплитуда уменьшается, поскольку физическая среда сопротивляется потоку электрической или электромагнитной энергии. Этот эффект известен как затухание сигнала. Затухание сигнала выражается потерей мощности сигнала на единицу длины кабеля, обычно в децибелах на километр (дБ/км).

2.5.3 Сеть доступа

Уровень доступа обычно состоит из устройств с подключением по технологии Ethernet/Wi-Fi/LTE, а значит необходимо создать такой участок в модельной сети, который соединит узлы в пределах одного или нескольких сегментов сети. Для решения таких задач подходят коммутаторы уровня доступа с поддержкой обозначенных технологий. В роли этого устройства выступают коммутаторы D-Link – DES-1210-28/ME (рис.21).



Рисунок 21 – Коммутатор D-Link – DES-1210-28/ME

Данные коммутаторы обеспечивают стабильную передачу данных по кабелям, могут соединяться с другими устройствами, и позволяют развернуть многоуровневые сети различных топологий (звезда, дерево, кольцо и т.д.). Имеют встроенные функции безопасности, которые предупреждают несанкционированный доступ к данным и распространение вредоносного трафика. Таким образом, сетевое подключение становится гибким и безопасным.

Коммутаторы D-Link – DES-1210-28/ME поддерживают протоколы Spanning Tree (STP), которые позволяют организовать резервный маршрут передачи данных при возникновении неисправности коммутатора на основном маршруте следования сетевого трафика. Также поддерживают стандарт 802.1p для управления качеством обслуживания (QoS), что дает возможность классифицировать трафик в режиме реального времени. [59].

С помощью данного коммутатора можно изменять пропускную способность каждого порта с шагом до 64 Кбит/с для исходящего и входящего трафика, следить за производительностью коммутатора и изменять ее при необходимости. Коммутатор поддерживает протокол LLDP (Link Layer Discovery Protocol), который позволяет коммутатору оповещать локальную сеть о своем существовании и характеристиках, что помогает лучше управлять топологией сети [59].

Также в рамках модельной сети может быть развернут беспроводной сегмент с помощью беспроводных маршрутизаторов.

2.5.4 Программное обеспечение

На стороне передатчика, где находится сервер, и на стороне приемника, где подключен робот-манипулятор, установлены персональные компьютеры (ПК). На каждом ПК запускается свое сетевое программное обеспечение. Программный код пишется на языке программирования – Python.

В программе на стороне Сервера с помощью программного кода описываются все необходимые задачи, которые робот-манипулятор должен выполнить. Задачи включают в себя набор различных команд. Каждая команда состоит из координат, в которые робот должен переместиться. Для использования робота при письме или при простом перемещении в пространстве, используются три координаты x , y , z . При дополнительном использовании вакуумного или механического захватов добавляется еще одна команда, которая отвечает за работу насадки, то есть включить или выключить работу захватов.

На стороне Клиента также должна быть написана программа на прием команд от Сервера и дальнейшей передачи их роботу-манипулятору. В программах также прописывается по какому протоколу передаются данные, по какому каналу связи они сообщаются. Если роботов-манипуляторов несколько, то количество программ на стороне Клиента должно соответствовать их количеству.

2.5.5 Программное обеспечение для перехвата и анализа трафика

Для перехвата и анализа сетевого трафика необходимо использовать специализированную программу-анализатор сетевого трафика, которую часто в литературе также называют «сетевой сниффер». С помощью такого сетевого сниффера можно перехватывать сетевые пакеты, находить и устранять ошибки в работе сетевого оборудования, обнаруживать постороннюю активность, анализировать работоспособность приложений, собирать статистику и т.д. Анализировать трафик можно в режиме реального времени, а также после сохранения перехваченного трафика [60].

В рамках данного исследования были рассмотрены источники, в которых авторами проводился обзор способов перехвата и анализа сетевого трафика, а также используемые для этого инструменты и ПО [61]. На основе полученной информации для выбора наиболее подходящего ПО была составлена сводная таблица (табл.6).

Таблица 6 – Сравнение характеристик популярных снифферов

Программы/ параметры	Наличие встроенных инструментов виртуализации и полученных данных (график скорости и трафика)	Формат файла экспорта	Min-й временной шаг и его возможность изменения между отчётами данных	Запуск мониторинг а по требованию
Wireshark	+/-	*.txt, *.px, *.csv, *.psml, *.pdml, *.c	0,001 сек. +	-
Iris The Network Traffic Analyzer	+/-	-	1 сек. +	-
Ethernet Internet traffic Statistic	-/+	-	1 сек. -	-
CommTraffic	-/+	-	1 сек. -	-
BMExtreme	+/-	-	5 мин. +	-
BWMeter	-/+	*.csv	1 сек. +	+
Bandwidth Monitor Pro	+/+	-	1 мин. +	-
DUTraffic	+/-	-	1 сек. -	-
Cacti	-/+	*.xls	1 сек. +	+

Из сравнения характеристик и функциональных возможностей различного ПО видно, что для решения поставленных в рамках исследования задач наиболее подходящим является ПО Wireshark [62].

Данный сетевой анализатор может работать на различных платформах, доступен бесплатно, имеет русскоязычный интерфейс, позволяет просматривать захваченные данные с помощью графического интерфейса, работает с большим

количеством сетевых протоколов. Собирает данные в реальном времени и производит автономный анализ. На рисунке 22 представлен интерфейс ПО Wireshark.

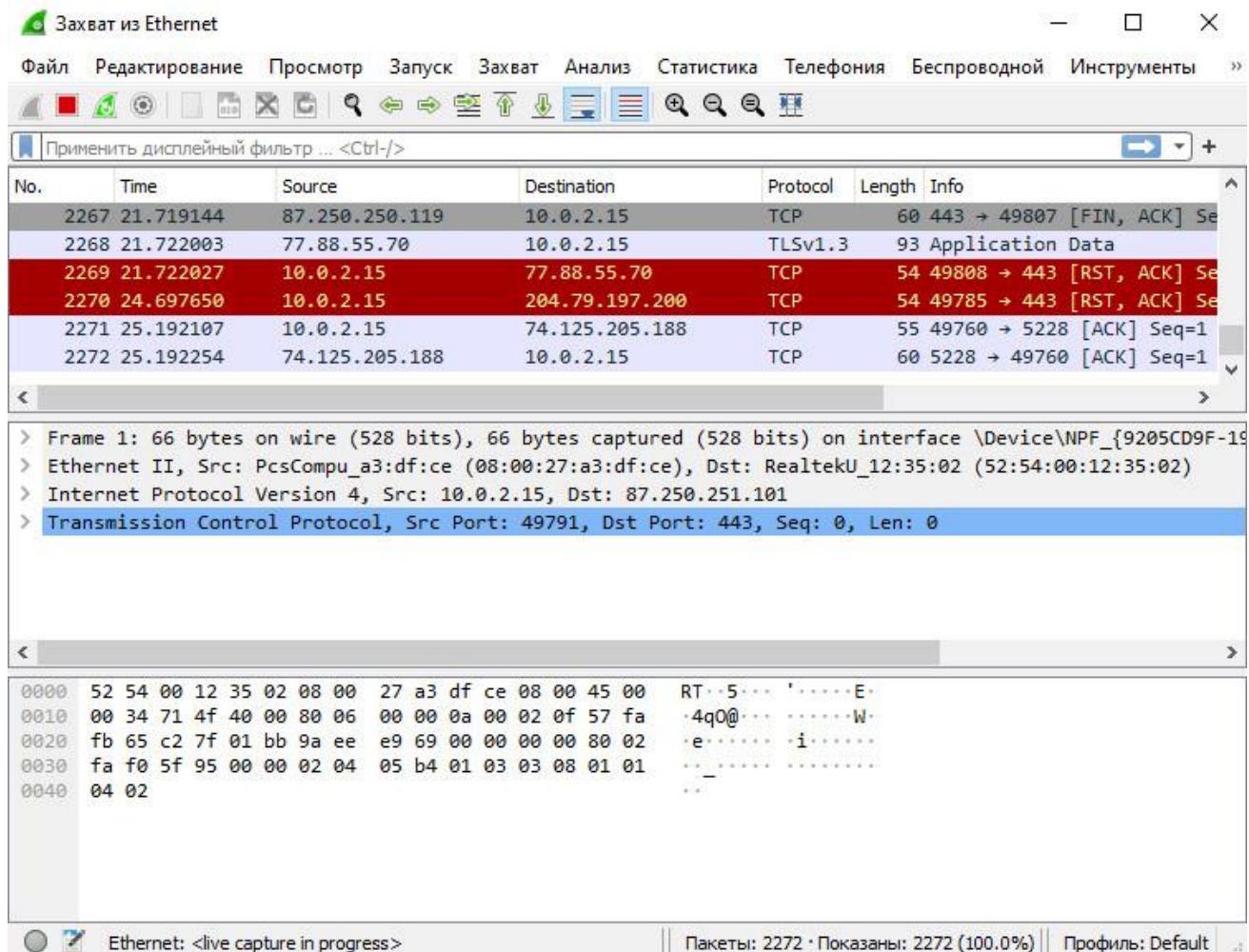


Рисунок 22 – Интерфейс программы Wireshark

Wireshark способен представить детальную информацию по каждому перехваченному пакету, включая его заголовки и содержимое. Данное ПО предоставляет пользователю удобные алгоритмы поиска и фильтрации сетевых пакетов, а также мощный механизм сбора и обработки статистики. Сохраненные данные можно экспортировать в различные форматы, что позволяет использовать перехваченный сетевой трафик в дальнейшем, например, при проведении имитационного моделирования [63].

2.6 Порядок проведения исследований на базе модельной сети

Выше были рассмотрены компоненты, необходимые для реализации модельной сети. На рисунке 23 представлена обобщенная структура модельной сети, которая использовалась при исследованиях функционирования робота-манипулятора [49].

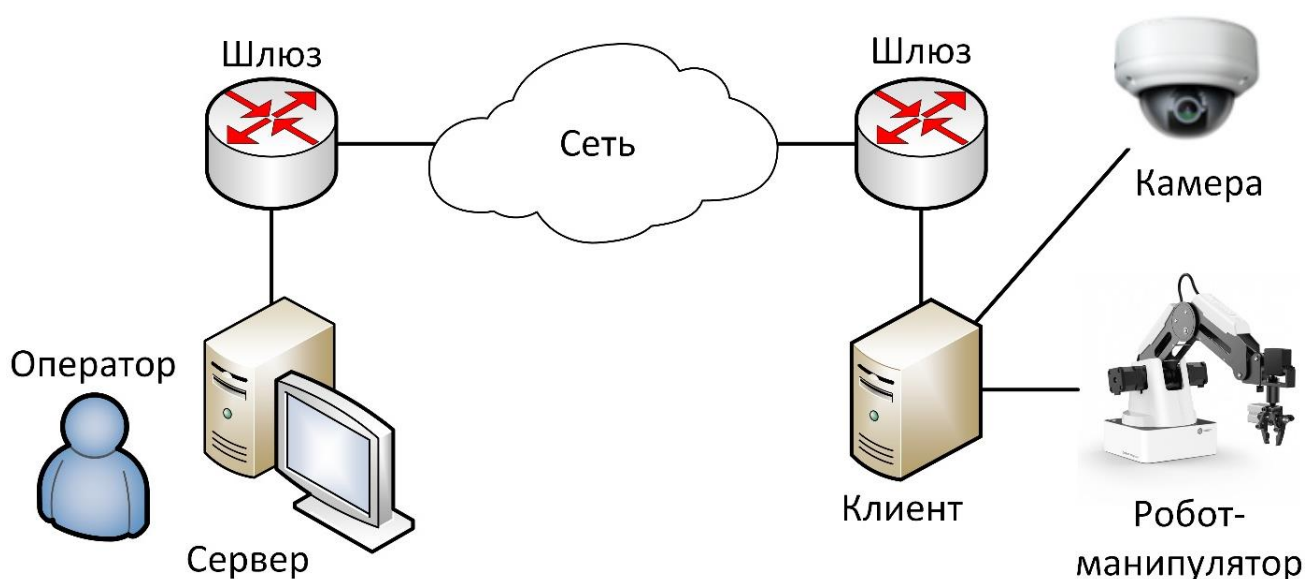


Рисунок 23 – Структура модельной сети сегмента робота-манипулятора

В данной модельной сети управление манипулятором осуществляется с Сервера, который соединен с Клиентом через некоторую Сеть, которая в свою очередь включает в себя опорную сеть и сеть доступа (DWDM систему, коммутаторы шлюзы доступа). Команды управления передаются с Сервера через Сеть на Клиент. Клиент обеспечивает подключение и непосредственное управление роботом-манипулятором или их группой.

Оператор следит за работой Сервера и Клиента, управляет настройкой оборудования Сети и оценивает параметры её работы, следит за состоянием и выполнением входящих команд роботом-манипулятором визуально или с помощью камеры.

В качестве дополнительных узлов в DWDM системе может быть задействован узел постановки помех, который может быть представлен аттенуатором, обеспечивающим ослабление оптического сигнала на физическом уровне до необходимого уровня.

Последовательность передачи команд управления от пользователя к манипулятору и наблюдение пользователем результата выполнения команды роботом-манипулятором представлена на рисунке 24.



Рисунок 24 – Передача команд от пользователя к манипулятору и наблюдение пользователем результата выполнения команды манипулятором

Сначала пользователь отправляет команду на ПК, который распознает ее и начинает передавать эти данные по сети к серверу. На сервере происходит обработка этих данных и передается дальше по сети к терминалу робота-манипулятора. Этот терминал получает и обрабатывает полученные команды, отправляет их роботу, и манипулятор начинает их выполнять.

Далее пользователю необходимо убедиться в правильности выполнения его команды. Это происходит с помощью дополнительных датчиков или камер, установленных на манипуляторе. Терминал робота получает и распознает результат, передает их по сети к серверу. Сервер обрабатывает полученную информацию и отправляет ее к ПК пользователя. Происходит представление этого

результата в понятном для человека виде. И пользователь делает выводы по выполнению команды [64].

2.7 Методика тестирования системы тактильного интернета с использованием сегмента роботов-манипуляторов

В рамках научно-исследовательской работы «Исследование новых принципов построения сетей связи 6G и предоставления перспективных услуг телеприсутствия» [65] для проведения исследований на базе описанной выше модельной сети была разработана программа и методика (далее – ПМИ) испытаний (тестирования) услуг телеприсутствия, предоставляемых на основе роботов-манипуляторов и/или их сообществ для реализации возможности дистанционного управления при выполнении различных задач в быту и хозяйственной деятельности. Натурные эксперименты на модельной сети проводились с использованием разработанной ПМИ. Подробное описание разработанной ПМИ (тестирования) услуг телеприсутствия на базе модельной сети представлено в Приложении А.

2.8 Выводы по главе

По содержанию главы можно сделать следующие выводы:

1. Дано определение модельной сети и рассмотрены области их применения, показана типовая структура различных типов модельных сетей, в т.ч. модельной сети для тестирования услуг Тактильного интернета.
2. Описан первоочередной набор услуг телеприсутствия, тестирование которых можно провести на базе модельной сети.

3. Рассмотрены программные, программно-аппаратные и аппаратные компоненты для реализации модельной сети. Подробно описан сам используемый в экспериментах робот-манипулятор и его технические характеристики.

4. Представлена структура модельной сети, разработанная для проведения перехвата и анализа сетевого трафика, генерируемого при дистанционном управлении роботами-манипуляторами.

5. Разработана методика тестирования системы тактильного интернета с использованием модельной сети, в т.ч. сегмента роботов-манипуляторов.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ НА БАЗЕ МОДЕЛЬНОЙ СЕТИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА И КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

3.1 Проблематика

На сегодняшний день большинство роботов управляются в дистанционном режиме непосредственно человеком-оператором или специализированным программно-аппаратным комплексом. На промышленных производствах, где количество роботов уже сегодня может превышать несколько сотен единиц, управлять каждым роботом по выделенной линии связи становится очень сложно или практически невозможным. Поэтому необходимым производить их кластеризацию по типу решаемых задач или по взаимному расположению, а управление кластером или группами кластеров может быть реализовано с помощью локально-вычислительных сетей [20].

В таком случае сетевой трафик управления роботами будет смешиваться с другим трафиком данных, речи, видео и т.д., что может создать проблемы при его доставке. Соответственно, главными задачами станут изучение особенностей сетевого управления роботами, определение характеристик генерируемого при этом сетевого трафика, и наиболее оптимальной архитектуры сети для управления роботами. А также немаловажным становится разработка требований к качеству обслуживания (QoS) [64, 66].

3.2 Существующие протоколы, используемые для передачи данных на роботов

Задача удаленного управления роботами является актуальной на сегодняшний день. Реализацию данной передачи данных могут поддерживать следующие стандартные протоколы: HTTP, ICMP, SNMP [55]. Протоколы позволяют проводить мониторинг и контролировать производительность сети.

Исследователи из Новосибирска рассмотрели удаленное управление роботом на базе XMPP-протокола. Он расширяет функциональность робота, в части реализации удалённого управления и контроля. Также была добавлена функция измерения количественной оценки временных задержек передачи команд управления роботом [67].

Используя систему управления через MQTT-протокол, устраняется проблема «с прохождением через роутер». Но задержка прохождения управляющих команд составляла около 100 мс [68].

Для обмена данными между человеком и роботом также существует протокол RScomm. Он разработан для высокой скорости передачи данных, надежности, и для взаимодействия с другими устройствами [69].

Для управления и запроса статуса состояния датчиков и приводов в реальном времени был создан серийный протокол RBC. С его помощью происходит обмен данными в реальном времени. Он дает возможность написания полного цикла контроля: запросить статус текущего состояния датчиков робота и его приводов, отозвать заданное движение и команды приводов [70].

Данные протоколы позволяют управлять роботами, но они не учитывают возможность ошибки робота. В дальнейших исследованиях будет рассмотрен протокол с контролем очереди на стороне клиента.

3.3 Сценарий передачи команд по протоколу ТСР

Изучение особенностей сетевого управления роботами, перехват и анализ генерируемого трафика проводились на ранее реализованной модельной сети сегмента робота-манипулятора (рис.23) [1].

Для реализации данных задач был использован транспортный протокол ТСР. Обмен сообщениями и последовательность действий при управлении роботом-манипулятором представлена в базовом сценарии (рис.25) [20].



Рисунок 25 – Базовый сценарий обмена сообщениями

В базовом сценарии обмена сообщениями при управлении роботом-манипулятором в одном сетевом пакете передается одна команда.

Сначала сервер отправляет сетевой пакет с командой на сторону клиента. Далее клиент сразу передает обратно на сервер подтверждение приема команды, и отправляет эту команду на исполнение роботу-манипулятору. Робот-манипулятор выполняет полученную команду, отправляет клиенту сообщение с координатами, в которых он стал находиться после выполнения этой команды. В свою очередь клиент рассчитывает разницу между полученными координатами от сервера и после выполнения от робота. И отправляет на сервер второе подтверждение о выполнении команды или сообщение об ошибке. Сервер должен получить два подтверждения от клиента по выполнению одной команды. В то время пока робот выполняет команду, сервер продолжает высылать новые команды на сторону клиента. На клиенте образуется очередь из команд, которая в случае ошибки робота (различие в разнице координат), удаляется.

Каждая команда, которую необходимо выполнить манипулятору, постоянно контролируется, а приступить к выполнению следующей команды манипулятор может только после получения результатов контроля выполнения [71].

3.4 Перехват и анализ сетевого трафика

Управляя роботом-манипулятором дистанционно и используя базовый сценарий обмена сообщениями, был перехвачен сетевой трафик на стороне клиента с помощью ПО Wireshark [62]. Дальнейшая обработка результатов измерений проходила с помощью табличного процессора.

Были рассмотрены четыре Приложения использования робота-манипулятора:

1. Без модулей – робот-манипулятор без сменных насадок осуществляет перемещение манипулятора в пространстве по заданным координатам;

2. Вакуумный захват – робот-манипулятор с насадкой вакуумного захвата осуществляет перемещение предмета в рамках зоны действия робота;

3. Механический захват – робот-манипулятор с насадкой механического захвата осуществляет перемещение предмета в рамках зоны действия робота;

4. Черчение – робот-манипулятор с насадкой пишущего пера осуществляет черчение геометрических фигур на поверхности листа бумаги.

В качестве характеристик для исследования сетевого трафика были выбраны следующие:

1. Количество пакетов в секунду – п/с;
2. Средний размер пакета – байт;
3. Скорость передачи данных – бит/с.

Продолжительность эксперимента была ограничена 5-ю минутами (300 сек.), поскольку за это время набирается достаточно представительная выборка пакетов.

В ходе эксперимента был перехвачен сетевой трафик для всех четырех Приложений, трафик рассматривался в двух направлениях: от клиента и от сервера. Необходимые для дальнейшего анализа характеристики сетевого трафика были импортированы из ПО Wireshark и представлены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 - Трафик, поступающий от клиента на сервер

Приложение / Характеристика	1 – Без модулей	2 – Вак. захват	3 – Мех. захват	4 – Черчение
Время перехвата, сек	300	300	300	300
Количество пакетов в секунду, п/с	2	2,8	3,1	12,7
Средний размер пакета, байт	55	55	55	55
Скорость передачи данных, бит/с	895	1228	1363	5620

Таблица 8 - Трафик, поступающий от сервера на клиента

Приложение / Характеристика	1 – Без модулей	2 – Вак. захват	3 – Мех. захват	4 – Черчение
Время перехвата, сек	300	300	300	300
Количество пакетов в секунду, п/с	2	2,8	3,1	12,7
Средний размер пакета, байт	96	96	94	85
Скорость передачи данных, бит/с	1565	2118	2354	8625

По полученным характеристикам видно, что сетевой трафик, поступающий от клиента, имеет фиксированную длину пакетов, обусловленную дополнительной отправкой подтверждений о выполнении команд. А сетевой трафик, который поступает от сервера, длина пакетов изменяется в соответствии с Приложением.

Скорость передачи данных зависит от сложности Приложения. Наибольшая интенсивность была при выполнении роботом-манипулятором черчения геометрических фигур. Это обусловлено тем, что точки (координаты) находятся очень близко и робот как будто рисует не отрываясь. Соответственно, не выполняет лишних движений на возврат в начальное положение.

Таким образом, чем больше установлено количество последовательных точек в пространстве, между которыми должен перемещаться робот-манипулятор, тем он более плавно и точно передвигается, что необходимо при выполнении высокоточных манипуляций. Однако, это увеличивает количество передаваемых команд управления.

Реализация базового сценария удобная, однако, имеет свои недостатки, одним из которых является накопление команд в буфере клиента. Процесс передачи команд управления с сервера на клиента и подтверждения их приема

никак не связан с процессом выполнения поступающих команд роботом-манипулятором. В результате чего на клиенте за короткий период времени накапливается большое количество ожидающих выполнения команд, которые в случае возникновения ошибки выполнения конкретной команды роботом-манипулятором и необходимости дальнейшей перезагрузки клиента оказываются потерянными [20].

Также данный подход требует значительных вычислительных затрат по контролю команд, и затрат сетевых ресурсов на обмен данными, что в совокупности приводит к вынужденным задержкам между выполнениями отдельных операций [71]. Становится необходимым оптимизировать передачу пакетов по сети для улучшения качества передаваемых данных управления.

В результате проведенного тестирования было установлено, что разработанное сетевое ПО управления роботами по базовому сценарию, показало низкую эффективность.

Для полного представления о том, какие длины пакетов наиболее часто встречаются в генерируемом трафике были построены гистограммы распределения длин пакетов данных для сетевого трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором на примере 4-го Приложения (рис.26, 27).

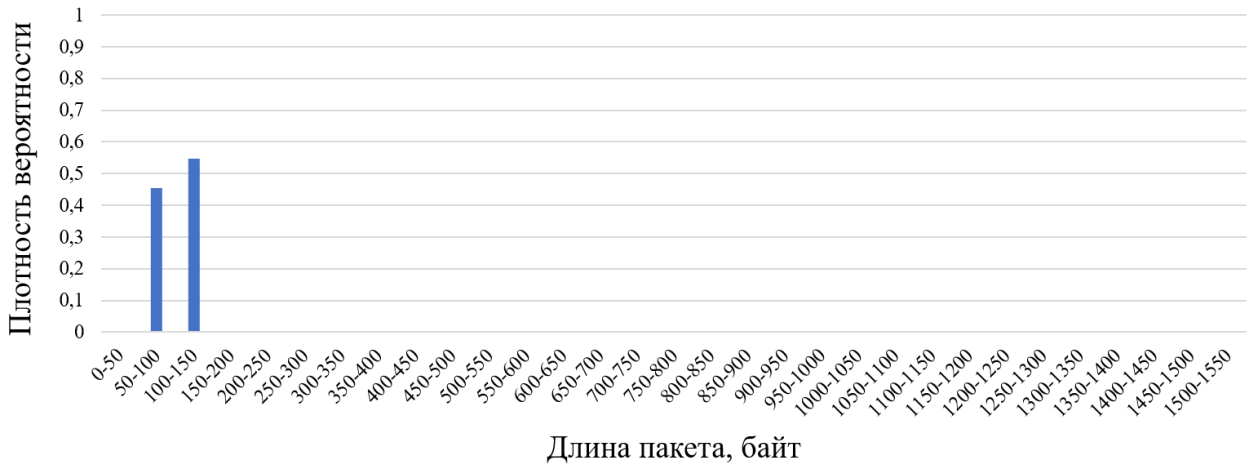


Рисунок 26 – Пример распределения длин IP-пакетов, генерируемых Сервером (интервал гистограммы равен 50 байт) для Приложения 4

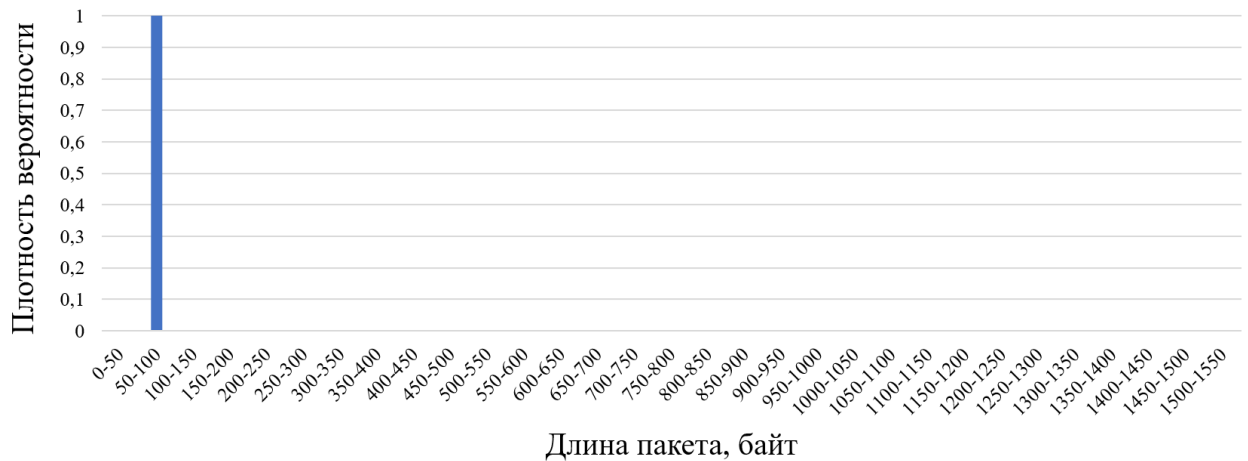


Рисунок 27 – Пример распределения длин IP-пакетов, генерируемых Клиентом (интервал гистограммы равен 50 байт) для Приложения 4

Сервером в основном передаются пакеты небольшой длины, так как в них находится только одна команда. Клиентом также передаются пакеты данных небольшой длины, которые несут в себе служебную информацию.

Далее на рисунках 28 и 29 представлены распределения величин интервалов времени между отправкой пакетов в сеть для трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором при использовании 4-го Приложения.

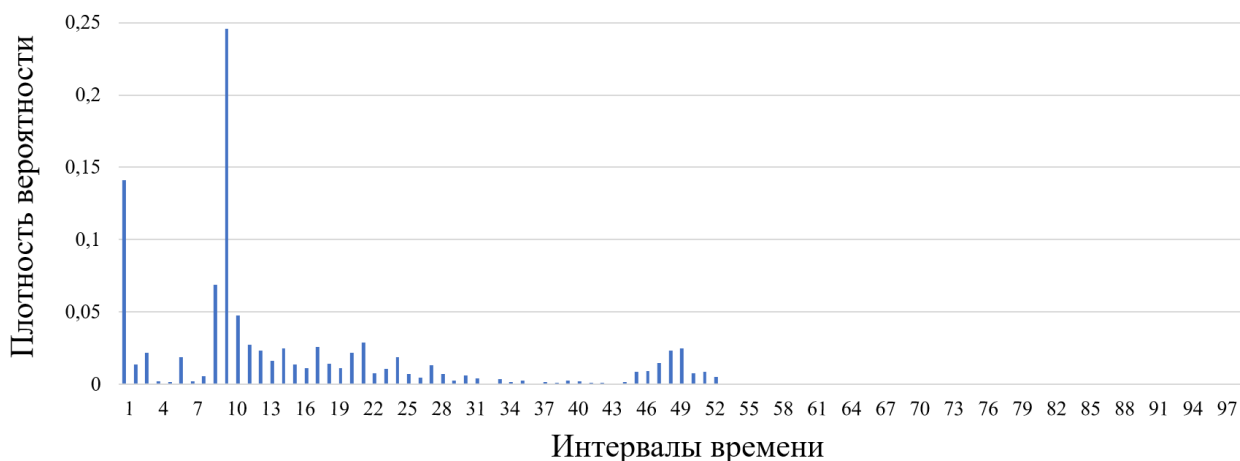


Рисунок 28 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Сервера (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 4

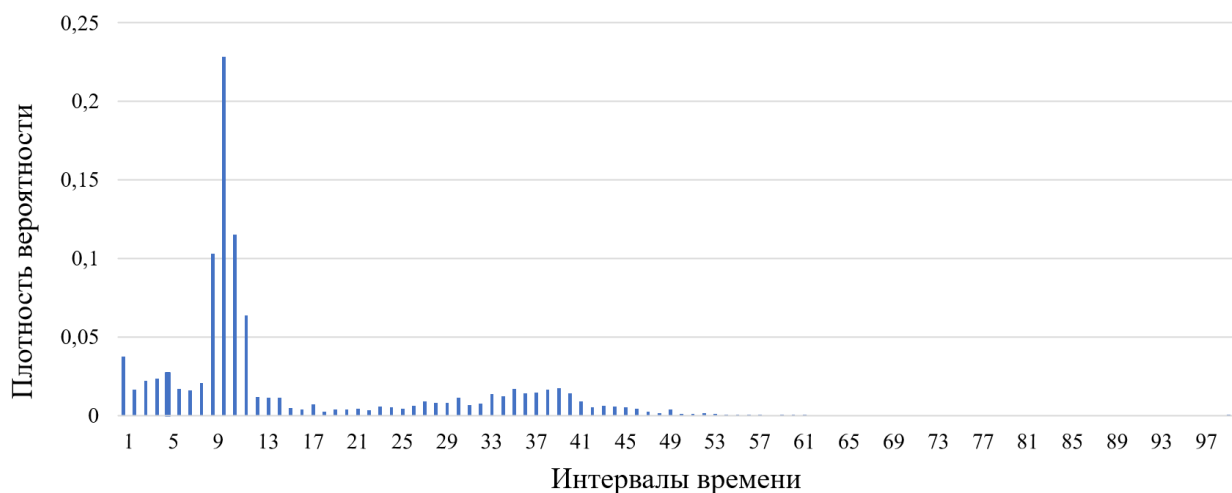


Рисунок 29 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Клиента (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 4

3.5 Исследование влияния задержек на передачу команд роботу-манипулятору

Далее на модельной сети был проведен эксперимент на передачу команд роботу-манипулятору через сеть с учетом вносимых задержек.

Из рисунка 24, на котором представлена поэтапная передача данных от пользователя до манипулятора с учетом обратной связи, максимальная допустимая задержка не должна превышать 1 мс. Данная задержка основывается на времени обработки и передачи команды на стороне пользователя, на времени обработки команды сервером, на времени обработки и передачи команды на стороне манипулятора, а также на времени получения результата пользователем о выполнении команды [64]. В противном случае, ухудшается качество предоставляемых услуг, происходят вибрации или некорректная работа манипулятора, также большая задержка может отразиться на несвоевременной реакции пользователя по исправлению различных ошибок. Чтобы этого избежать необходимо контролировать качество обслуживания на компонентах модельной сети, и учитывать возможные потери или задержки [64].

Оконечные станции DWDM системы не вносят задержек в сеть с учетом их построения. В данном случае учитывается фиксированная задержка из-за распространения сигнала по волокну – 5 мкс/км в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т [32]. Основными источниками задержки могут являться коммутаторы и терминал с роботом-манипулятором [30, 49].

С помощью программного обеспечения терминалов для получения задержек, в системе DWDM устанавливается переменный аттенюатор. Меняя значение затухания аттенюатора с шагом перестройки 0,1 дБ, можно изменять вероятность ошибки в системе практически до состояния, когда сигнал не проходит вовсе. Изменение вероятности ошибки дает возможность варьировать задержку доставки пакетов, содержащих команды управления роботом. А определение влияния задержки на процесс управления является главной задачей экспериментальных исследований на модельной сети [30, 49].

При затухании аттенюатора до 20 дБ (длина тракта составляет около 100 км), вероятность ошибки не увеличивается, что подтверждает экспериментом. Данное явление обусловлено тем, что вносимое затухание частично компенсируется системой автоматической регулировки усиления (АРУ). То есть выходной сигнал автоматически поддерживается постоянным по амплитуде или мощности сигнала,

независимо от параметров входного сигнала. Также поддержание низкой вероятности ошибки обеспечивает система упреждающего кодирования FEC, которая исправляет ошибки методом упреждения. Применяется для исправления сбоев и ошибок при передаче данных путём передачи избыточной служебной информации, на основе которой может быть восстановлено первоначальное содержание.

В данном случае аттенюатор не вносит линейные искажения, поэтому при использовании линии с длиной около 100 км, результат будет несколько хуже в связи с дополнительным уменьшением помехозащищенности, обусловленным, главным образом, фазочастотными искажениями [30, 49].

Сценарий исследования представлен на рисунке 30. ПК на стороне передатчика формирует UDP-дейтаграммы, которые содержат в себе команды управления, и отправляет их на сторону приемника. ПК на стороне приемника, открывает один порт UDP-сокета для прослушивания приходящих дейтаграмм, и передает их на манипулятор. Каждая команда имеет свой номер, для фиксирования отправленных и полученных команд на той и другой стороне.



Рисунок 30 – Сценарий исследования модельной сети сегмента робота-манипулятора

Используя транспортный протокол UDP, рассматривается передача от передатчика к приемнику без подтверждения. Каждая команда последовательно передавалась каждые 100 мс. При каждом значении затухания эксперимент проводится 3 раза, длительностью по 2 минуты. В результате каждого эксперимента определяется коэффициент доставки пакетов, значение задержки и вероятность битовой ошибки в канале. Были рассмотрены два Приложения робота: перенос предмета и рисование кругов.

При потере дейтаграмм команды не доставляются приемнику, а значит, манипулятор пропускает нужное местоположение при выполнении переноса предмета или точки при рисовании кругов.

Выполняя перенос предмета из одной точки в другую, манипулятор проходит определенный путь. При значении затухания большем, чем 23,5 дБ, становится заметна задержка в выполнении задач манипулятором. При этом перенос предмета является некорректным и неточным. На рисунке 31 представлен график влияния затухания на коэффициент доставки пакетов манипулятору.

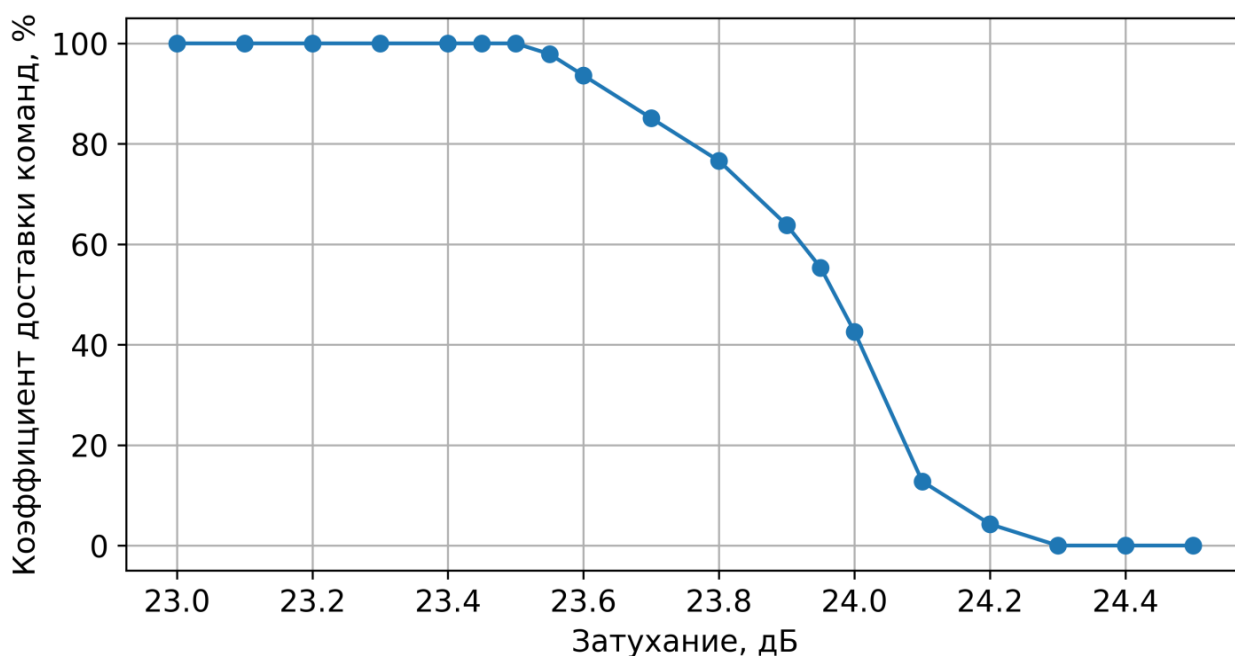
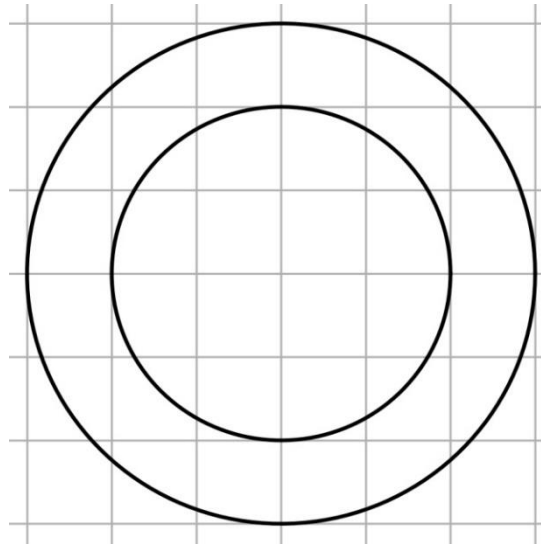
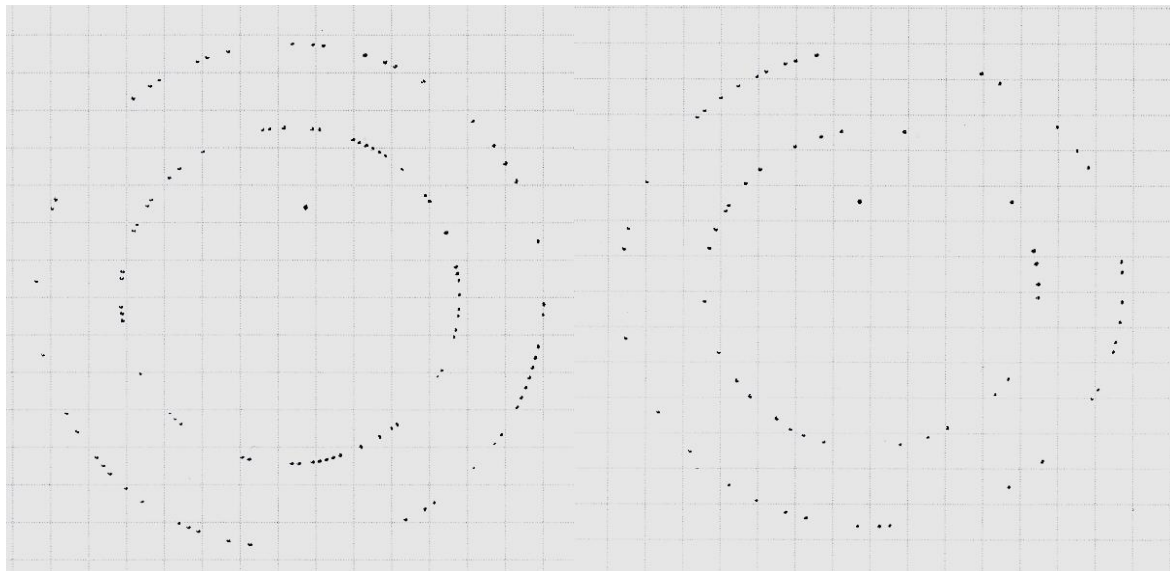


Рисунок 31 – Влияние затухания на коэффициент доставки пакетов

Для рисования кругов роботом-манипулятором круги были разбиты на точки с координатами. На рисунке 32 изображены круги, которые были нарисованы манипулятором при различных значениях затухания. Таким образом, при затухании большего, чем 23 дБ, манипулятор не смог нарисовать целые круги.



a)



б)

в)

Рисунок 32 – Круги, нарисованные манипулятором, при разных значениях затухания: 23 дБ (а); 23,3 дБ (б); 23,4 дБ (в)

На рисунках 33, 34, 35 изображены зависимости задержки, коэффициента доставки пакетов и битовой ошибки от расстояния. Расстояние определено в соответствии с тем, что 0,2 дБ соответствуют с приемлемой для практики точностью расстоянию в 1 км.

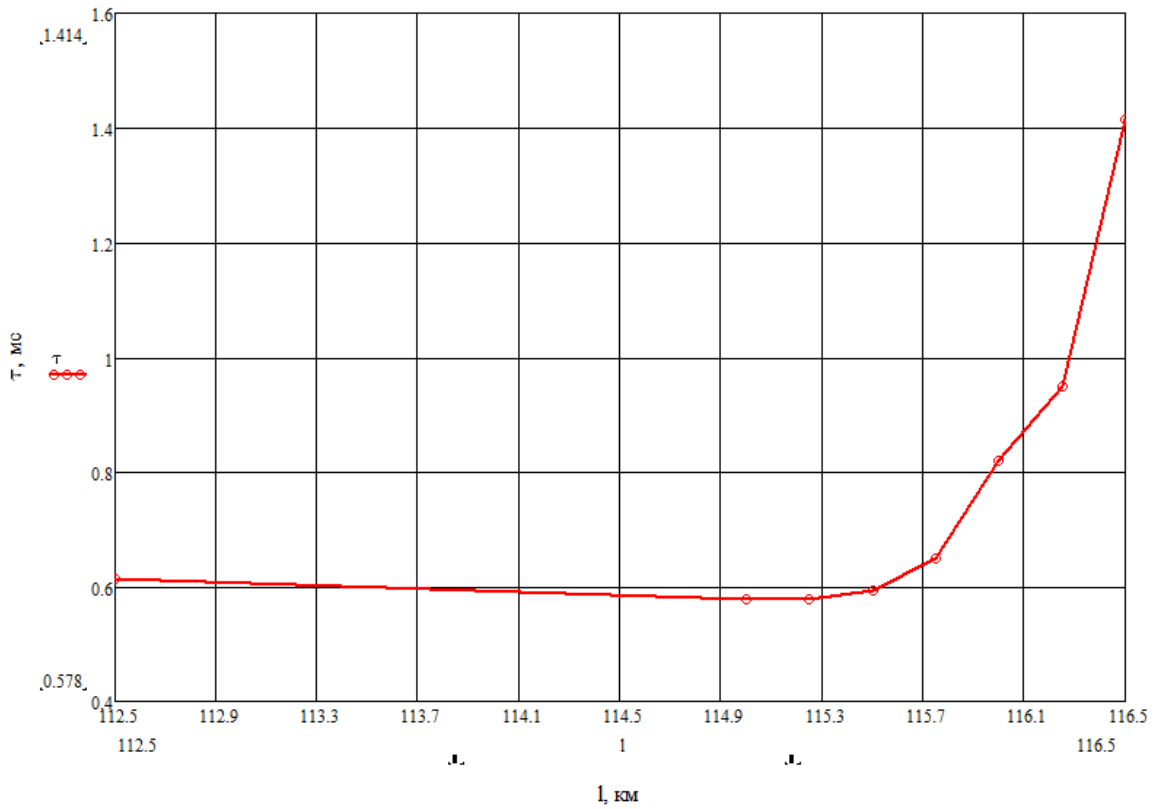


Рисунок 33 – Зависимость задержки от расстояния

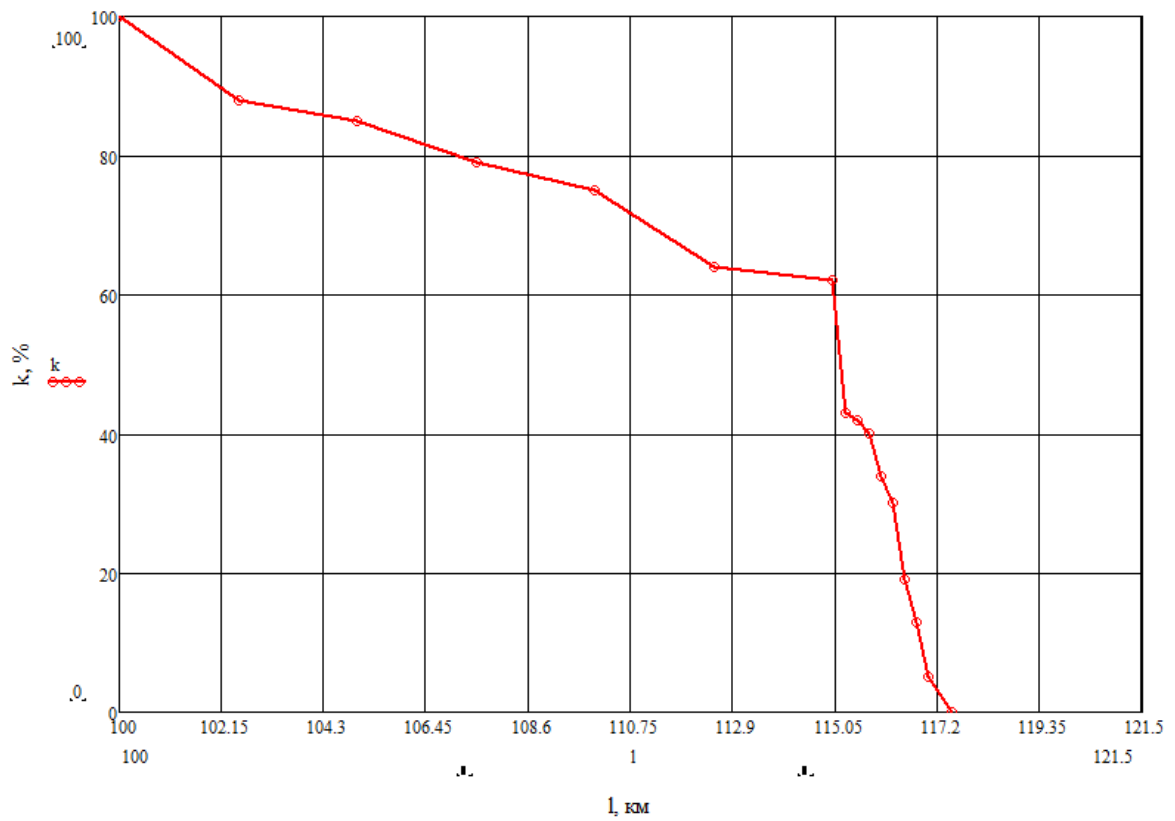


Рисунок 34 – Зависимость коэффициента доставки пакетов от расстояния

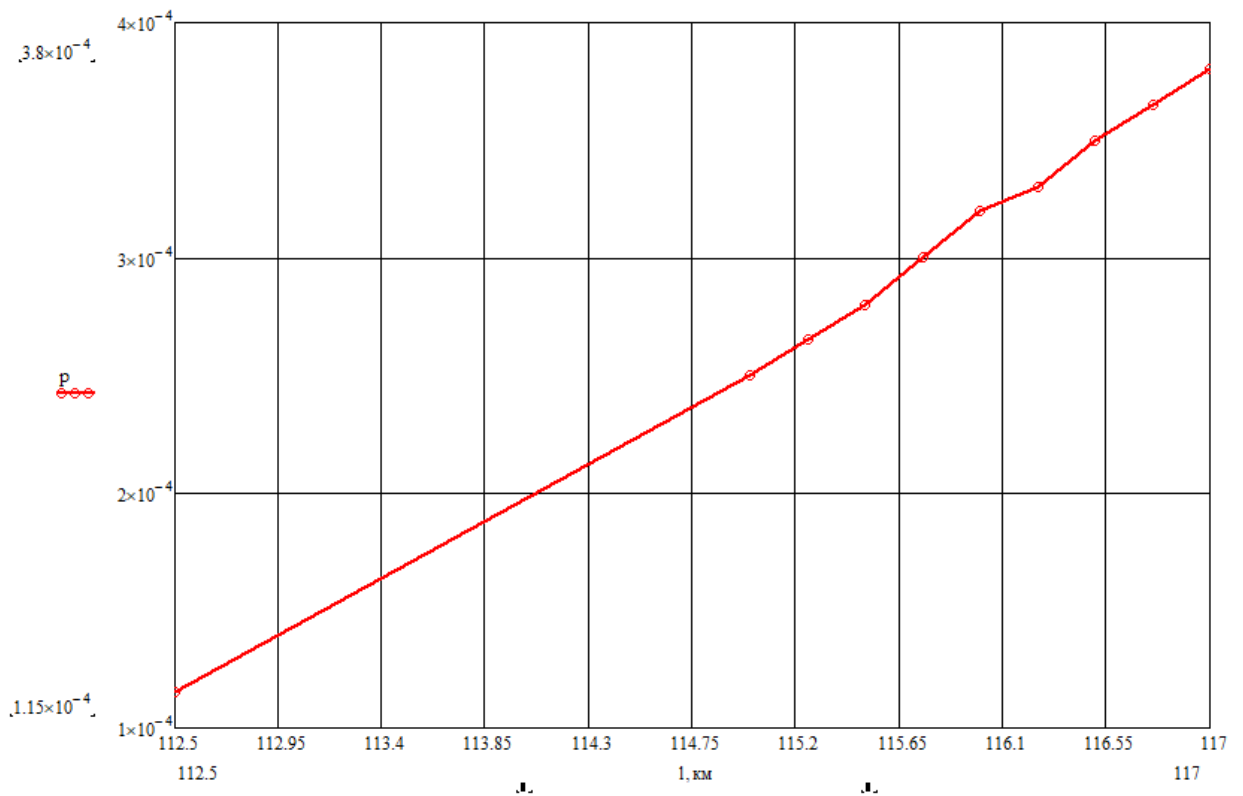


Рисунок 35 – Зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния

Из приведенных зависимостей существенный рост задержки начинается при значениях расстояния примерно в 115 км. Для коэффициента доставки пакетов лавинообразное уменьшение происходит также в области расстояния величиной в 115 км, вероятность битовой ошибки увеличивается более, чем в 2 раза. Эти экспериментальные данные дают основания полагать, что следует уточнить рекомендуемое МСЭ-Т значение в 5 мкс на один километр [30, 49].

Экспериментальное исследование на модельной сети двух различных Приложений манипулятора по переносу груза и рисованию круга дает возможность рассматривать показатели для обеспечения качества обслуживания с заданным уровнем по допустимой задержке как единые для таких услуг и независимые от характера производимого Приложения на многофункциональном роботеманипуляторе [49].

Результаты исследования необходимы для дальнейших разработок требований к параметрам качества обслуживания и качества восприятия при предоставлении услуг телеприсутствия.

Значимость исследования состоит в получении неизвестных ранее характеристик сетевого трафика для услуги телеприсутствия, что расширяет знания в области теории телетрафика. И полученные характеристики сетевого трафика могут быть использованы для планирования и проектирования сетей.

3.6 Выводы по главе

По содержанию главы можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены существующие протоколы, которые используются для управления роботами.

2. Определены характеристики сетевого трафика для исследований. Описаны 4 Приложения (задачи) работы манипулятора. Представлен базовый сценарий обмена сообщениями при управлении роботом-манипулятором. На базе модельной

сети перехвачен и исследован сетевой трафик. Данный подход требует значительных вычислительных затрат по контролю команд, и затрат сетевых ресурсов на обмен данными, что в совокупности приводит к вынужденным задержкам между выполнениями отдельных операций.

3. Описан порядок проведения исследования по определению степени влияния затухания в сигнале при передаче команд.

4. Проведено исследование влияния затухания на передачу команд роботу-манипулятору на разработанной модельной сети. И получены результаты по определению предельного значения расстояния в 115 км, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора в сети связи общего пользования.

ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ И ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ

4.1 Модель взаимодействия робота-манипулятора, системы управления и сети связи

Для эффективного использования сетевых ресурсов для дистанционного управления роботом-манипулятором была разработана модель взаимодействия между системой управления и роботом-манипулятором с условием серийной передачи команд. Также для передачи максимальных полезных данных был представлен метод выбора и поддержания оптимальных параметров взаимодействия с сетью.

Схематично модель взаимодействия системы управления с роботом-манипулятором можно представить тремя элементами (рис.36):

- система управления (СУ);
- сеть связи (СС);
- робот-манипулятор (РМ).

На стороне робота-манипулятора находится контроллер управления механизмом (С) и буфер команд (В).

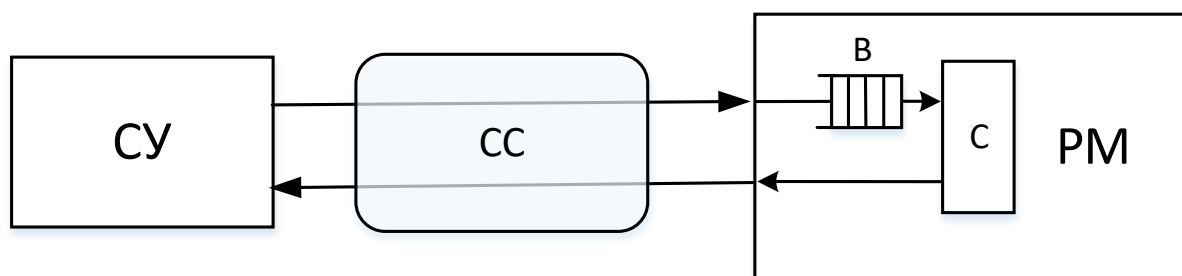


Рисунок 36 – Модель взаимодействия системы управления с роботом-манипулятором

Диаграмма обмена данными между системой управления и роботоманипулятором приведена на рисунке 37.

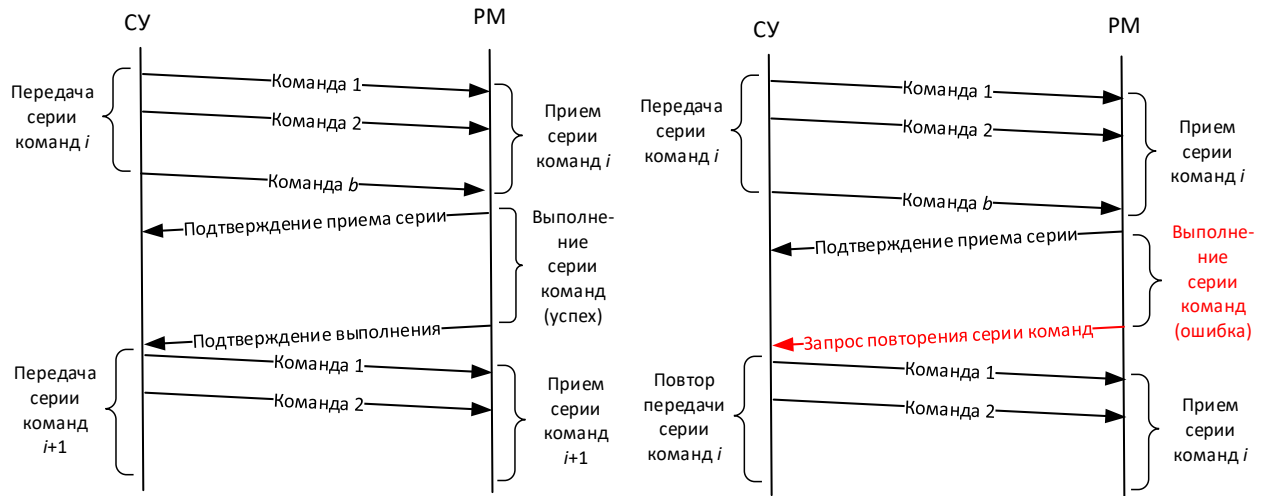


Рисунок 37 – Диаграмма обмена данными между СУ и РМ

Робот-манипулятор (РМ) получает от системы управления (СУ) серию из некоторого количества команд (b) и помещает их в буфер (В). Робот-манипулятор (РМ) информирует систему управления (СУ) о приеме серии команд и помещении ее в буфер (В). Далее манипулятор (РМ) выполняет необходимые команды, последовательно считывая их из буфера (В). При успешном выполнении последовательности команд, робот-манипулятор (РМ) сообщает системе управления (СУ) о выполнении серии и готовности принять следующую серию из команд.

Если при выполнении команд из серии произошло неуспешное событие, т.е. манипулятор (РМ) не выполнил некоторую i -ю команду серии, то содержимое буфера стирается, а робот-манипулятор (РМ) отправляет системе управления (СУ) запрос о необходимости повторной отправки серии команд.

Под неуспешным событием понимается не результат выполнения команды, а невозможность робота выполнить ее. Если команда заключается в перемещении предмета, и во время ее выполнения он выпал из манипулятора, то команда считается выполненной манипулятором, но результат ее выполнения будет визуально отрицателен. Невозможность выполнения команды может быть вызван

различными причинами, возникающими в самом механизме манипулятора, и зависит от многих факторов.

Исходя из представленного обмена данными можно сказать, что функционирование модели зависит от вероятности неуспешного выполнения операции p_{ns} .

4.2 Метод повышения эффективности использования ресурсов сети связи

Основываясь на приведенной модели взаимодействия, был разработан метод повышения эффективности использования ресурсов сети связи для организации взаимодействия системы управления (СУ) и робота-манипулятора (РМ).

Эффективность обмена данными (e) – это отношение доли полезных данных к общему объему переданных данных

$$e = \frac{U}{A}, \quad (1)$$

где U – объем полезных данных – команды, которые переданы, приняты и успешно выполнены в системе; A – общий объем данных.

Эффективность обмена данными зависит от таких факторов как вероятность ошибки манипулятора при выполнении команды и размер передаваемых данных.

Объем полезных данных определяется, как общее количество данных для всех выполненных команд:

$$U = \sum_{j=1}^m S_{DC_j}, \text{ байт} \quad (2)$$

где S_{DC_j} – объем данных j -й команды (байт); m – количество успешно выполненных команд.

При одном и том же размере всех команд $S_{DC_j} = S_{DC_i} = S_{DC}$; $i, j=1, \dots, m$

$$U = mS_{DC}, \text{ байт} \quad (3)$$

Все команды передаются сериями из b команд, где b – число команд, помещаемое в буфер робота-манипулятора (РМ), соответственно, количество успешно выполненных команд m в формуле (2) приравнено значению b : $m=b$. И с учетом условия (3):

$$U_s = bS_{\text{DC}}, \text{ байт} \quad (4)$$

где b – количество команд в серии.

Общий объем данных определяется исходя из того, что существует ненулевая вероятность ошибки (невыполнения) команды, эта вероятность одинакова для всех команд и они независимы. При ошибке выполнения вся серия команд стирается из буфера (В) робота-манипулятора (РМ), производится ее перезапрос и повторная передача от системы управления (СУ) к роботу-манипулятору (РМ). Таким образом, для успешного выполнения серии команд в общем случае может потребоваться k попыток (передач). В таком случае имеет место схема Бернулли, а число передач случайно и имеет геометрическое распределение [72].

Общий объем данных в (1) определяется как

$$A = (U_s + L)\bar{k}, \text{ байт} \quad (5)$$

где L – количество данных в служебных сообщениях (запросах и подтверждениях) из расчета на одну серию команд; \bar{k} – среднее количество передач серии команд.

Среднее значение для геометрического распределения равно

$$\bar{k} = \frac{1}{(1 - p_{\text{er}})^b}, \quad (6)$$

где p_{er} – вероятность ошибки выполнения команды РМ; $(1 - p_{\text{er}})^b$ – вероятность того, что серия команд будет выполнена, т.е. вероятность успеха.

Если вероятности неуспеха выполнения команд различны, то (6) будет иметь вид

$$\bar{k} = \frac{1}{\prod_{i=1}^b (1 - p_i^{(er)})} \quad (7)$$

где $p_i^{(er)}$ вероятность ошибки при выполнении i -й команды из серии.

А эффективность канала, определенная как (1) с учетом (3)–(7), можно вычислить как

$$e(b) = \frac{bS_{DC} \prod_{i=1}^b (1 - p_i^{(er)})}{bS_{DC} + L} \quad (8)$$

Или для случая равных вероятностей ошибки $p_{er} = p_i^{(er)}; i=1, \dots, m$

$$e(b) = \frac{bS_{DC} (1 - p_{er})^b}{bS_{DC} + L} \quad (9)$$

На рисунке 38 приведена зависимость (9), с учетом, что размер команды управления равен $S_{DC}=128$ байт, а размер команд подтверждения приема серии и подтверждения выполнения в сумме $L=108$ байт, вероятность ошибки выполнения команды $p_{er}=0,01$.

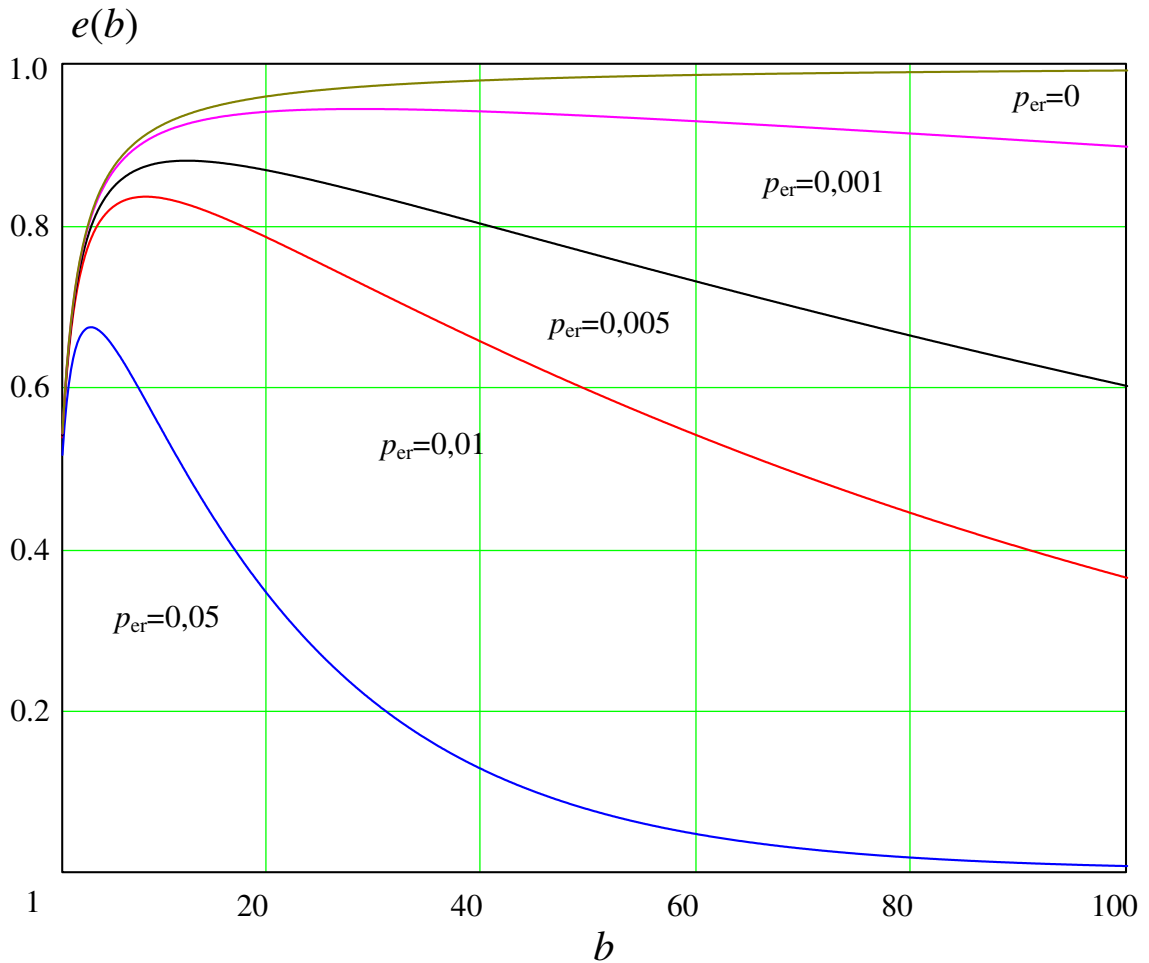


Рисунок 38 – Зависимость эффективности использования канала от количества команд в серии

Из (8) и (9) видно, что если вероятность ошибки равна нулю, то эффективность зависит только от доли служебных данных и стремится к единице при увеличении размера серии. Из этих выражений и рисунка 38, видно, что при ненулевой вероятности ошибки эффективность использования канала связи изменяется при изменении размера серии команд, и эта зависимость имеет максимальное значение, которое может быть найдено как решение выражения

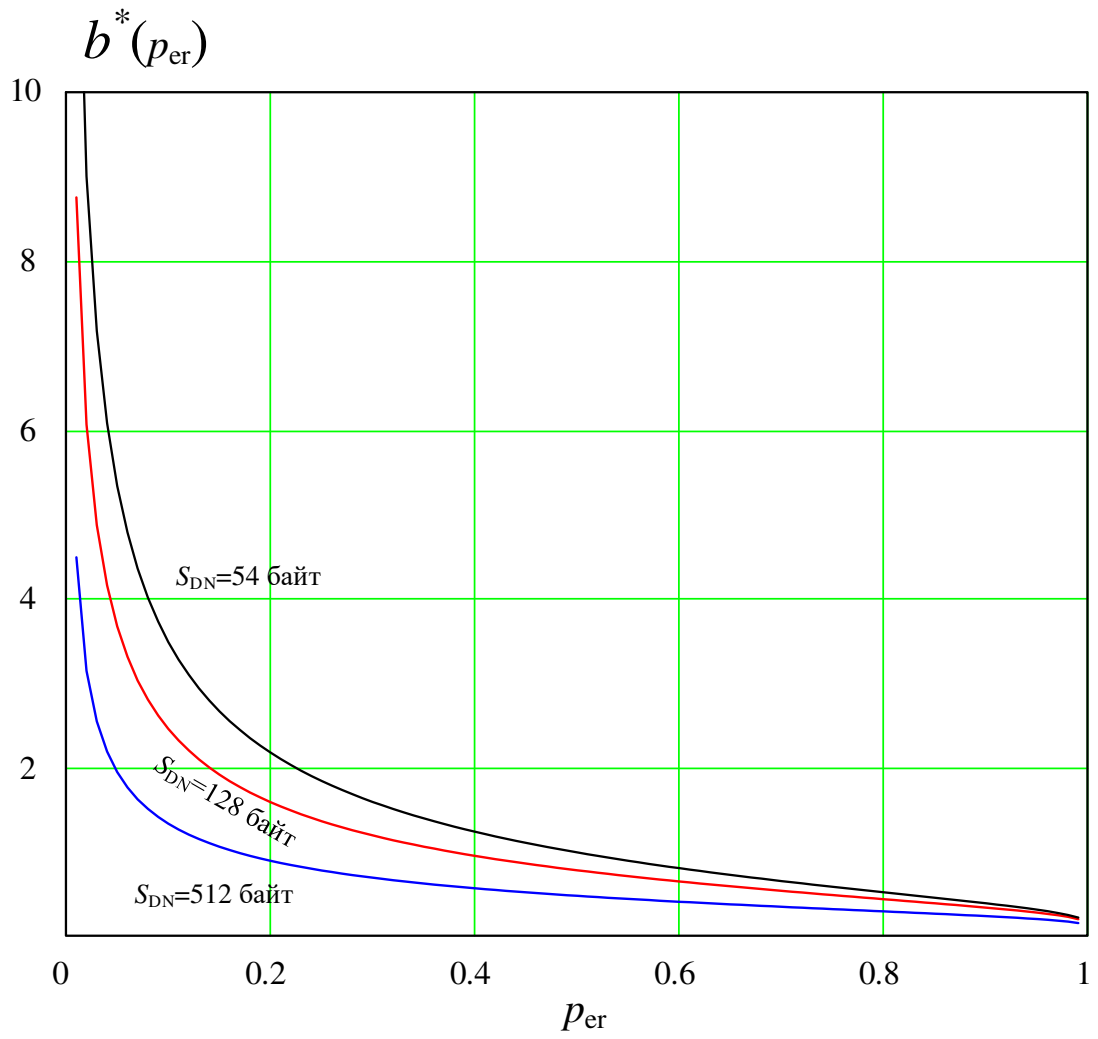
$$b^* = \arg \max_b e(b); \quad b \geq 0 \quad (10)$$

Решение (10) получено классическим методом нахождения экстремума функции и дает в результате выражение для b^* :

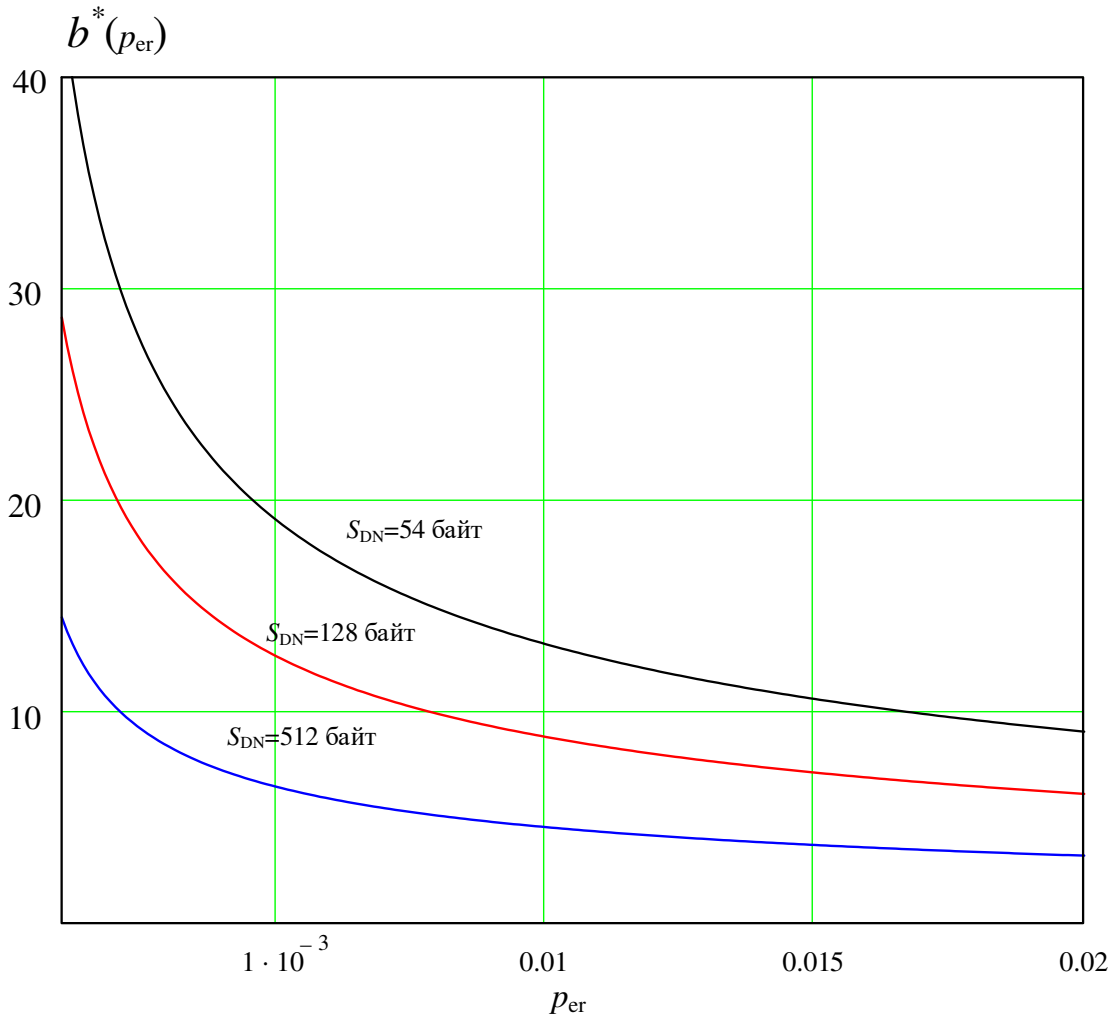
$$b^* = -\frac{L}{2S_{\text{DC}}} - \frac{\sqrt{L^2 \ln(1-p_{\text{er}})^2 - 4LS_{\text{DC}} \ln(1-p_{\text{er}})}}{2S_{\text{DC}} \ln(1-p_{\text{er}})} \quad (11)$$

Из (11) видно, что оптимальное количество команд в серии b^* зависит от вероятности ошибки робота, количества передаваемых данных (размеров команд S_{DC}) и количества служебных данных L . Количество служебных данных определяется размером сообщений о подтверждении или перезапросе данных.

На рисунке 39 представлена зависимость оптимального количества команд в серии от вероятности ошибки и количества данных в команде. На рисунке 39а приведена зависимость во всем диапазоне значений вероятности ошибки, а на рисунке 39б – при относительно малых ее значениях. Второй случай может оказаться ближе к реальной ситуации.



а) во всем диапазоне значений вероятности ошибки



б) при относительно малых значениях вероятности ошибки

Рисунок 39 – Зависимость оптимального количества команд в серии от вероятности ошибки при разном количестве данных в команде

Таким образом, оптимальное количество команд в серии уменьшается с ростом вероятности ошибки выполнения команды робота-манипулятора (РМ) и при увеличении количества данных в команде.

Выигрыш эффективности, который достигается данным способом оценивается, как

$$\Delta e = \frac{e(p_{er}, b^*) - e(p_{er}, 1)}{e(p_{er}, 1)} 100 \% \quad (12)$$

где $e(\dots)$ - определяется выражением (9).

За точку сравнения в этом случае выбран режим, когда $b=1$.

В процессе функционирования работа-манипулятора могут произойти изменения вероятностей ошибок выполнения операций, поэтому необходимо вести статистику ошибок и корректировать значения соответствующих вероятностей.

Вероятность ошибки определяется моделью независимых испытаний и может быть описана схемой Бернулли. Тогда доверительный интервал для вероятности [73] определяется как

$$\overline{p_{er}} = p_{er} \pm G_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{p_{er}(1-p_{er})}{n}}, \quad (13)$$

где $p_{er} = \frac{n_{er}}{n}$; n – общее количество наблюдений (выполнений операции); n_{er} – количество ошибок при выполнении операции; $G_{1-\alpha/2}$ – квантиль нормального распределения для доверительной вероятности $(1-\alpha/2)$.

Тогда достоверность оценки согласно выражению (13) можно описать относительной ошибкой оценки вероятности как

$$\delta = 100 G_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{1-p_{er}}{np_{er}}} \quad (14)$$

Сбор статистики следует вести циклически и обновлять значения вероятности ошибки, когда достоверность статистической ее оценки достаточна, т.е. величина, определяемая (14) не превышает заданную величину допустимой погрешности $\delta \leq \delta_0$.

Алгоритм, реализующий описанный метод управления процессом обмена данными, приведен на рисунке 40.

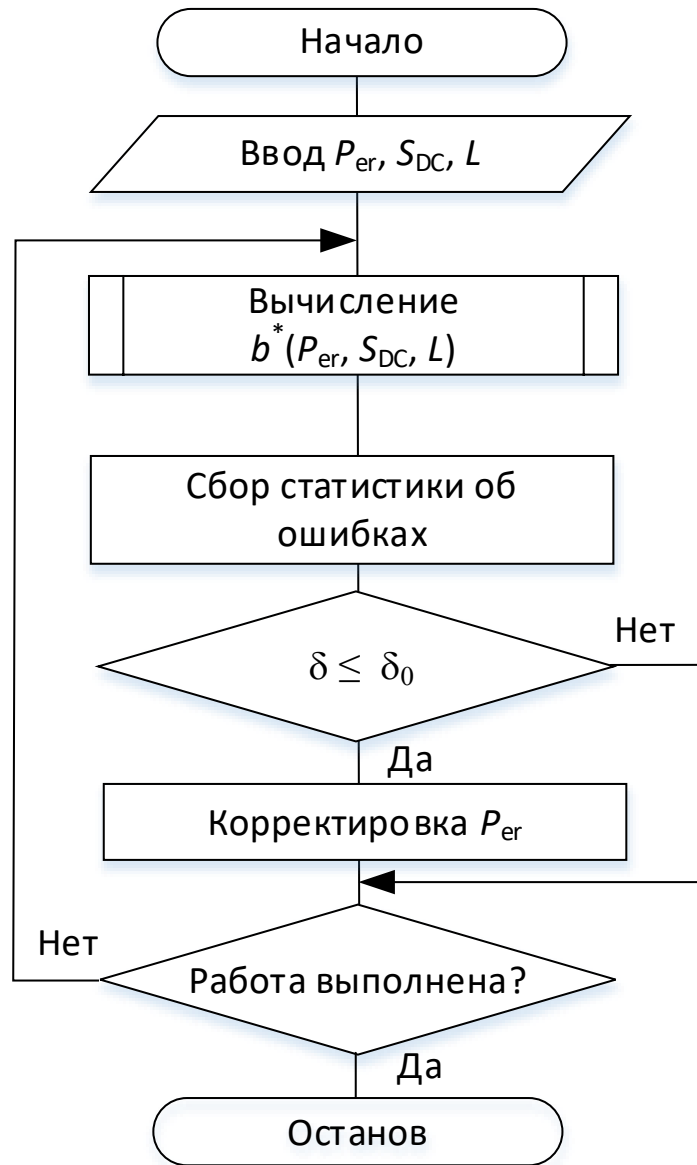


Рисунок 40 – Алгоритм реализации метода управления обмена данными

Предложенный метод и реализующий его алгоритм позволяют поддерживать параметры взаимодействия при изменении вероятностей ошибок выполнения команд в течение всего времени функционирования робота-манипулятора таким образом, что использование сетевых ресурсов близко к оптимальному в смысле доли полезных данных.

Решение задачи (10) позволяет выбрать оптимальный в смысле максимальной доли полезных данных режим обмена. Этот результат можно интерпретировать с позиции времени доставки данных, полагая что решение (10) позволяет доставить требуемое количество команд минимальным объемом

переданных данных. Время доставки данных определяется их объемом и скоростью передачи, поэтому, при неизменной скорости передачи, уменьшение объема передаваемых данных ведет к уменьшению времени их доставки.

Время доставки команд оценивается, как

$$t_D = \frac{N8S_{DC}}{r}(1 - e(b)) \quad , \text{ с} \quad (15)$$

где N – количество передаваемых команд; r – скорость передачи данных (бит/с); $e(b)$ – эффективность согласно выражению (9).

Результаты оценки времени передачи из расчета на одну команду приведены на рисунке 41 при размере команды 128 байт, размере служебных команд 54 байта и скорости передачи 115,200 кбит/с.

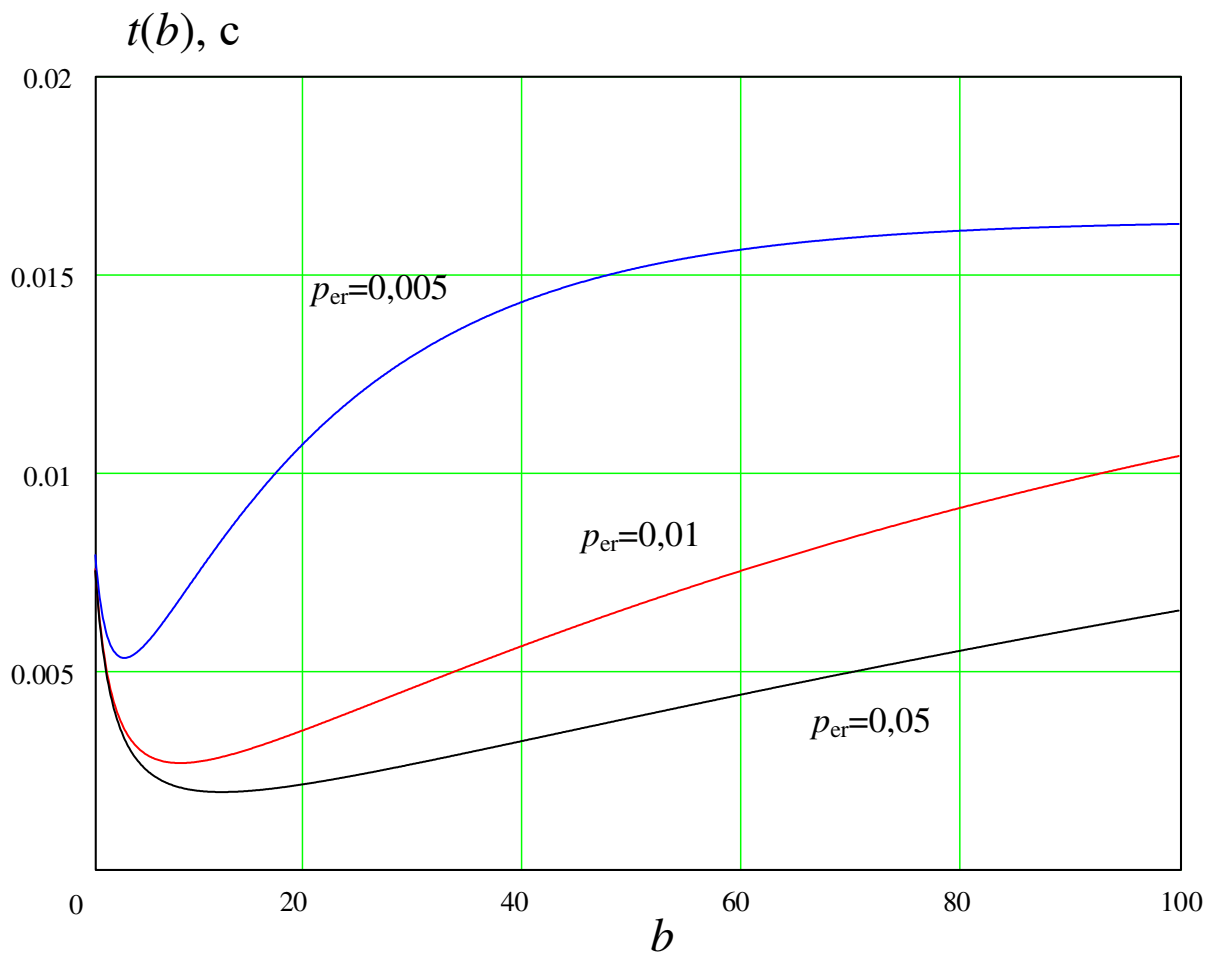


Рисунок 41 – Зависимость времени доставки данных от числа команд в серии из расчета на одну команду

Как и следовало ожидать, зависимости времени повторяют характер зависимостей эффективности от размера серии (рис.38). Таким образом, решение задачи (10) обеспечивает минимизацию времени доставки команд за счет сокращения доли непроизводительного трафика [71].

4.3 Сценарий передачи команд с использованием алгоритма по реализации метода управления обмена данными

Основываясь на модель взаимодействия системы управления (СУ) и робота-манипулятора (РМ) и на предложенный новый алгоритм по реализации метода управления обмена данными [71], был описан новый сценарий тестирования для его реализации на модельной сети и предложен новый сетевой протокол [20].

Реализация алгоритма сетевого взаимодействия между сервером и клиентом с подключенными роботами-манипуляторами фактически является разработкой сетевого протокола прикладного уровня по модели OSI, который базируется на основе транспортного протокола TCP и в рамках исследований получил рабочее название SRMP (Simple Robot Management Protocol) [20].

Основное отличие сценария по предложенному алгоритму от базового сценария заключается в том, что команды передаются не одиночно, а в сериях по несколько штук. Серии команд имеют переменную длину, которая зависит от вероятности возникновения ошибки выполнения конкретной команды роботом, которая в свою очередь постоянно пересчитывается. Подтверждение получения команд и их выполнение при этом остается.

Для эффективного построения процесса функционирования робота-манипулятора необходимо выбрать параметры, которые будут реализовывать алгоритм с сериями команд. Таким образом, обозначим оптимальное количество команд в серии как b^* , размер одной команды (который зависит от приложения) как S_{DC} , суммарный размер служебных сообщений, передаваемых в рамках одной

серии команд как L , а вероятность ошибки выполнения отдельной команды как p_{er} , метод нахождения экстремума функции, дает в результате выражение (11) [20].

Сценарий обмена сообщениями и последовательность действий для описанного алгоритма представлены на рисунке 42 [20].

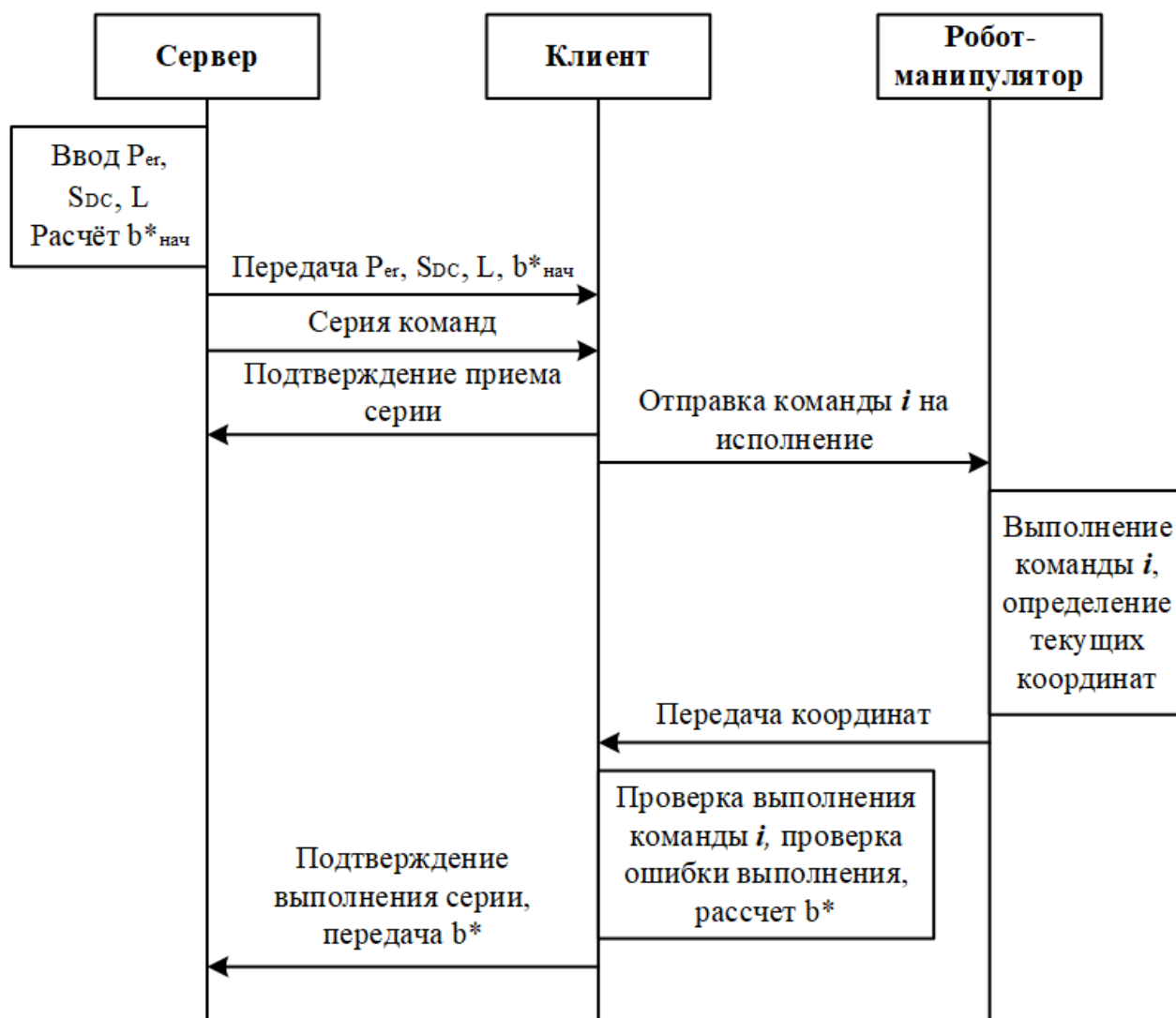


Рисунок 42 – Сценарий обмена сообщениями (с реализацией предложенного алгоритма)

На стороне Сервера оператором ПО вводятся значения p_{er} , S_{DC} , L , $b^*_{нач}$ и/или рассчитываются автоматически в начале работы, например, исходя из используемого Приложения. Далее эти значения передаются на Клиента, а следом передается серия команд, которая попадает в буфер. Клиент отправляет на Сервер первое подтверждение о приеме серии команд и поочередно отправляет команды

из буфера манипулятору. Манипулятор выполняет команды и передает координаты обратно Клиенту для сравнения их с полученными от Сервера. По мере накопления информации о выполненных командах и возникающих ошибках происходит перерасчет b^* . После сверки правильности выполнения каждой команды из серии, и расчета новой b^* , Клиент отправляет на Сервер второе подтверждение о выполнении серии вместе с новым значением b^* .

Таким образом, данный сценарий позволяет существенно сократить издержки, связанные с обменом данными и контролем выполнения операций. Однако в случае неуспеха какой-либо операции вся последовательность команд в буфере стирается, а система управления должна вновь сформировать и отправить эту последовательность.

4.4 Перехват и анализ сетевого трафика по улучшенному сценарию

По разработанной модельной сети сегмента робота-манипулятора с учетом внесенных в ПО изменений согласно представленному алгоритму, был повторно произведен перехват и последующий анализ сетевого трафика для четырех Приложений. Результаты данных экспериментов представлены в таблицах 9 и 10.

Таблица 9 – Трафик, поступающий от клиента на сервер (с реализацией предложенного алгоритма)

Приложение / Характеристика	1 – Без модулей	2 – Вак. захват	3 – Мех. захват	4 – Черчение
Время перехвата, сек	300	300	300	300
Количество пакетов в секунду, п/с	0,1	0,1	0,1	0,4
Средний размер пакета, байт	56	56	56	56
Скорость передачи данных, бит/с	44	53	56	162

Таблица 10 – Трафик, поступающий от сервера на клиента (с реализацией предложенного алгоритма)

Приложение / Характеристика	1 – Без модулей	2 – Вак. захват	3 – Мех. захват	4 – Черчение
Время перехвата, сек	300	300	300	300
Количество пакетов в секунду, п/с	0,1	0,2	0,2	0,5
Средний размер пакета, байт	423	468	450	449
Скорость передачи данных, бит/с	451	609	622	1874

Из данных таблиц также видно, что изменение значений характеристик имеет ту же логику, что и при реализации базового сценария.

4.5 Сравнение характеристик сетевого трафика

Для наглядной оценки изменений значений характеристик сетевого трафика после реализации в ПО управления роботом-манипулятором алгоритма сетевого взаимодействия, было проведено сравнение данных из таблиц 9-12. Результаты сравнения представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Сравнение характеристик сетевого трафика

Приложение / характеристика	Трафик, поступающий от сервера на клиента			Трафик, поступающий от клиента на сервер		
	Количество пакетов в секунду, п/с					
	Было	Стало	Изменение	Было	Стало	Изменение
Приложение 1	2	0,1	–95%	2	0,1	–95%
Приложение 2	2,8	0,2	–93%	2,8	0,2	–93%
Приложение 3	3,1	0,2	–94%	3,1	0,2	–94%
Приложение 4	12,7	0,5	–96%	12,7	0,5	–96%
ИТОГ	Изм. среднее		–94%	Изм. среднее		–94%
	Средний размер пакета, байт					
	Было	Стало	Изменение	Было	Стало	Изменение
Приложение 1	96	423	+341%	55	56	+2%
Приложение 2	96	468	+388%	55	56	+2%
Приложение 3	94	450	+379%	55	56	+2%
Приложение 4	85	449	+428%	55	56	+2%
ИТОГ	Изм. среднее		+384%	Изм. среднее		+2%
	Скорость передачи данных, бит/с					
	Было	Стало	Изменение	Было	Стало	Изменение
Приложение 1	1565	451	–71%	895	44	–95%
Приложение 2	2118	609	–71%	1228	53	–96%
Приложение 3	2354	622	–74%	1363	56	–96%
Приложение 4	8625	1874	–78%	5620	162	–97%
ИТОГ	Изм. среднее		–74%	Изм. среднее		–96%

Сравнивая данные характеристик в таблице 11, видно, что после реализации предложенного алгоритма значительно сократилась нагрузка на сеть при дистанционном управлении роботом-манипулятором. Так, например, скорость передачи данных от сервера к клиенту сократилась на 74%, а средний размер пакета вырос на 384%. Эти данные подтверждают теоретические расчеты предложенного метода по эффективному использованию сетевых ресурсов [20].

4.6 Вероятностные распределения

Такая характеристика сетевого трафика, как средняя длина пакета данных, не дает полного представления о том, какие длины пакетов наиболее часто встречаются в генерируемом трафике. Для наглядного представления этой информации, полученной в ходе проведения исследований, необходимо построить гистограммы распределения длин пакетов для всех исследуемых Приложений.

Далее на рисунках 43-50 представлены распределения длин пакетов данных для сетевого трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором при использовании всех четырех Приложений. Максимальная длина пакета данных на гистограмме ограничена максимальным размером кадра технологии IEEE 802.3 Ethernet [74], которая использовалась как технология доступа, равным 1518 байт.

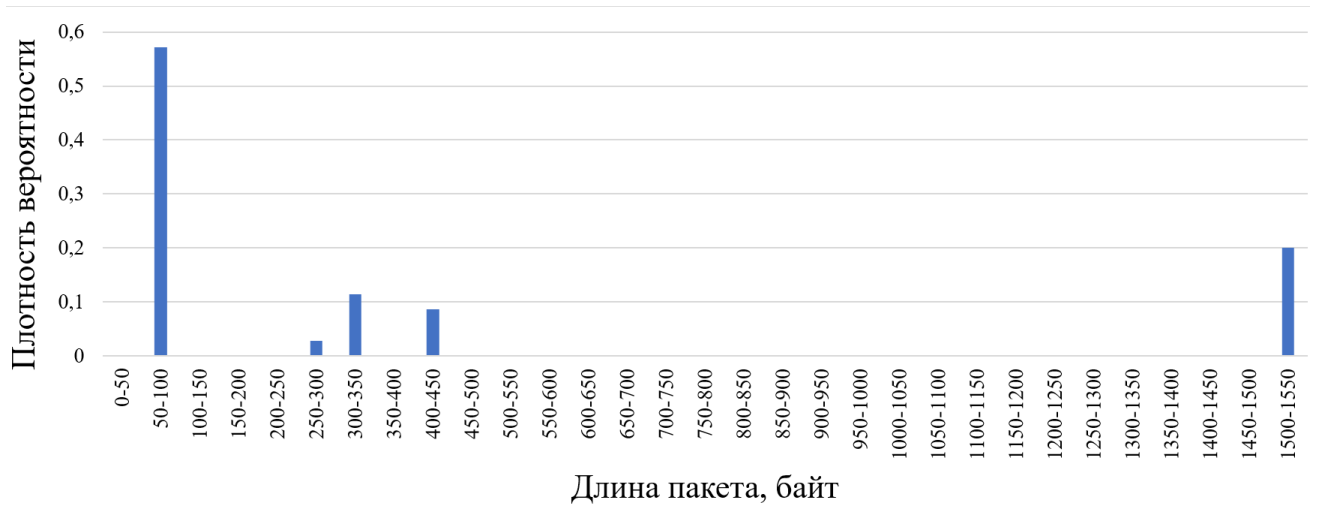


Рисунок 43 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Сервером (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 1

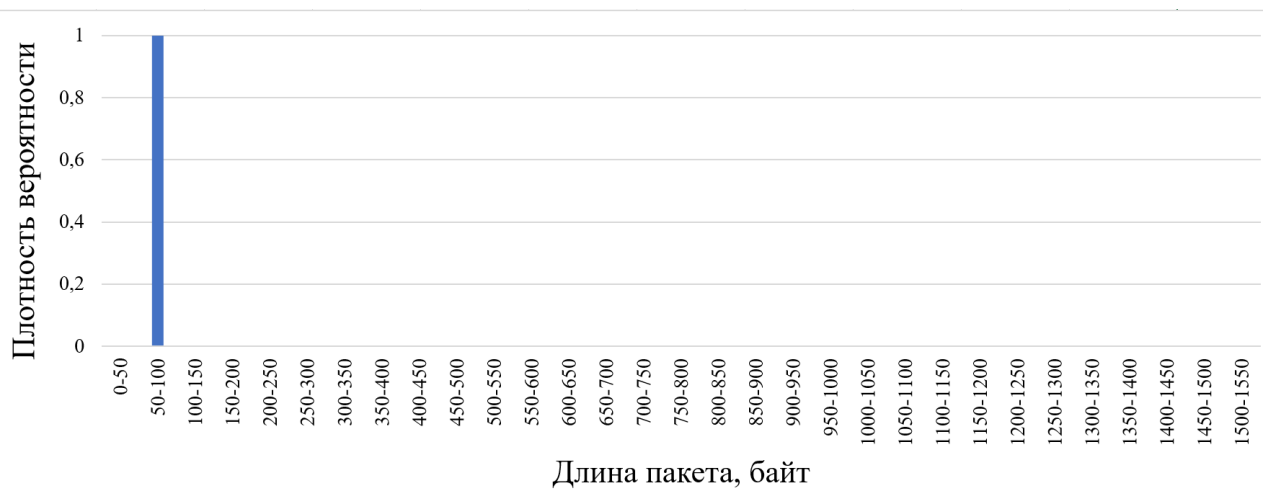


Рисунок 44 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Клиентом (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 1

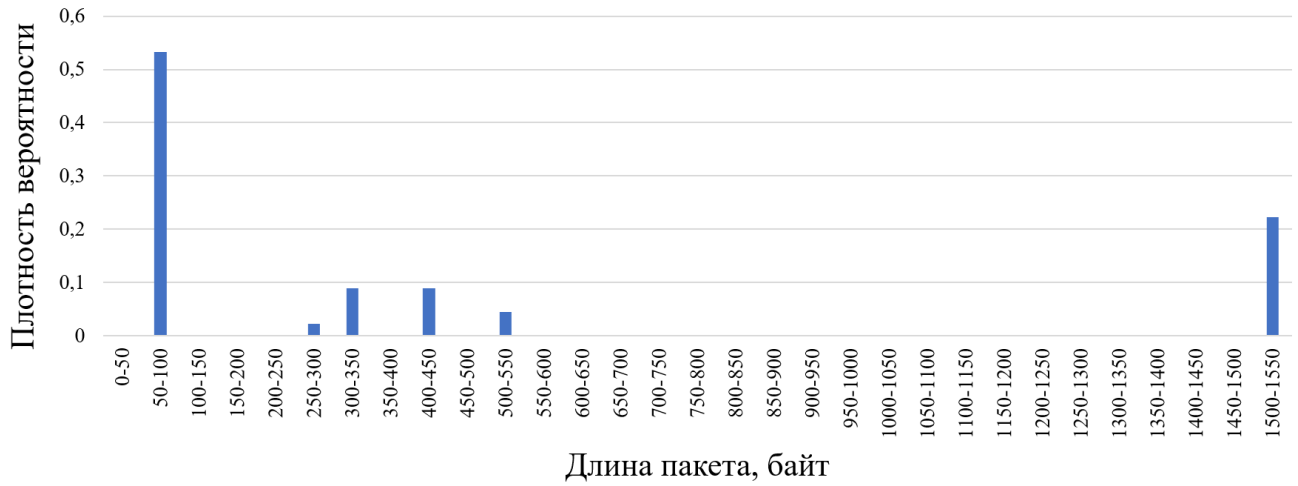


Рисунок 45 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Сервером (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 2

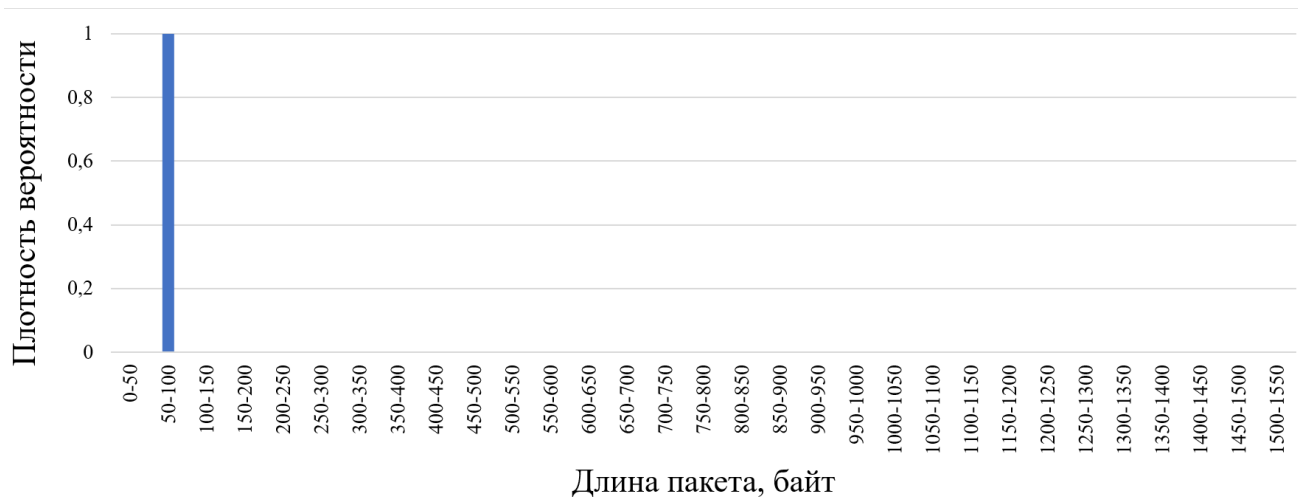


Рисунок 46 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Клиентом (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 2

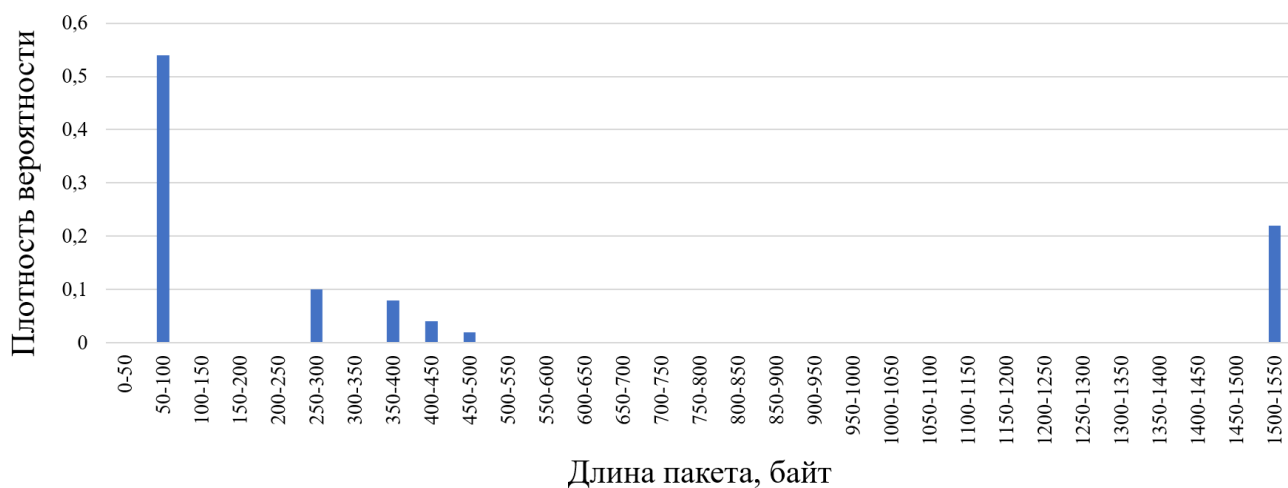


Рисунок 47 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Сервером (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 3

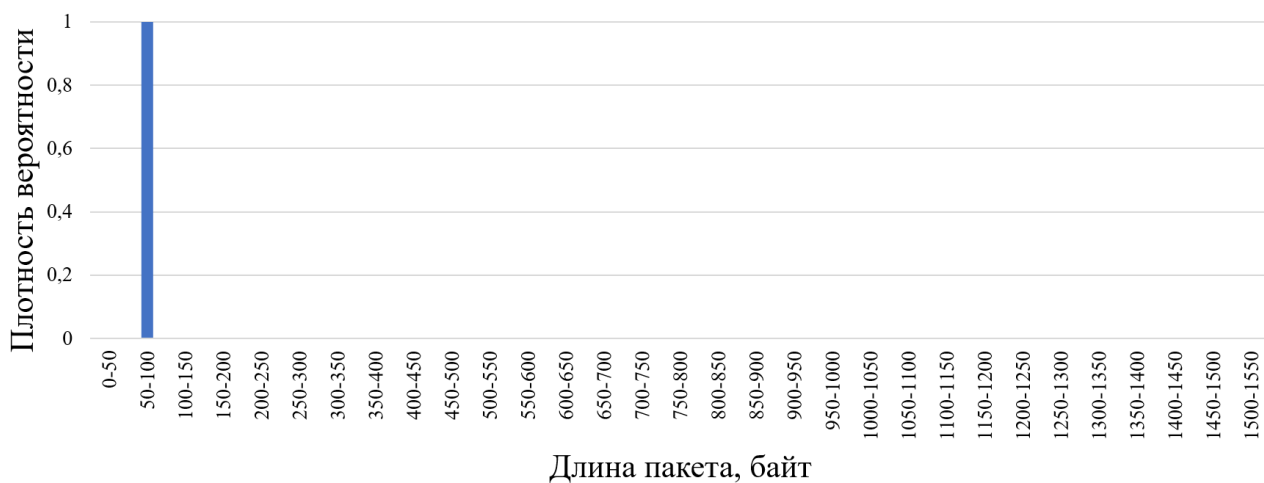


Рисунок 48 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Клиентом (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 3



Рисунок 49 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Сервером (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 4

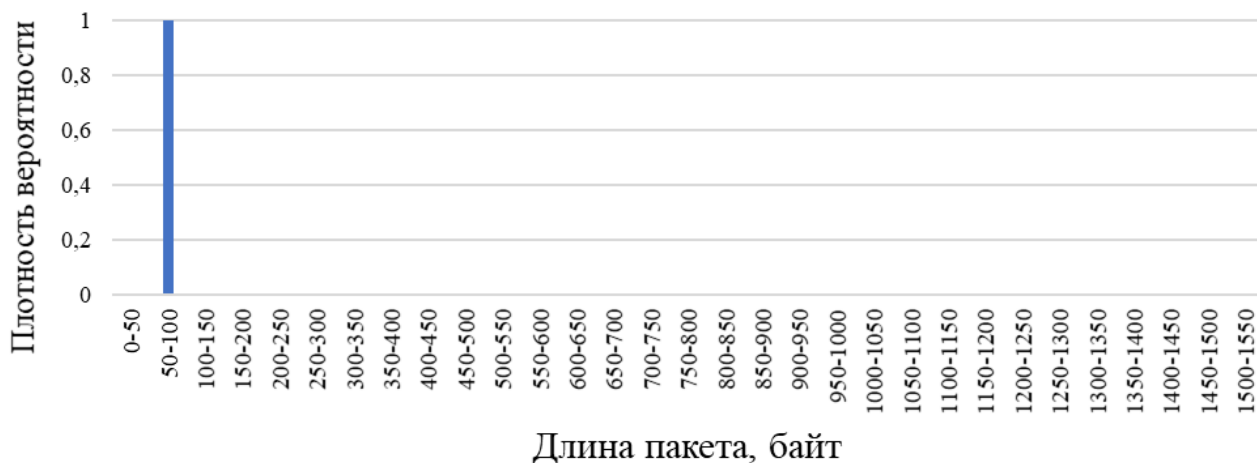


Рисунок 50 – Распределение длин IP-пакетов, генерируемых Клиентом (интервал гистограммы равен 50 байт), Приложение 4

Из представленных распределений длин пакетов данных для всех четырех Приложений использования роботов-манипуляторов можно сделать следующие выводы:

– Сервером в основном передаются либо пакеты данных небольшой длины, которые генерируются в рамках установки соединения между Сервером и Клиентом и происходящим обменом служебной информацией, либо пакеты данных (в т.ч. большой длины), представляющие собой серии команд;

– Клиентом передаются пакеты данных небольшой длины, которые являются либо подтверждениями приема, либо подтверждениями выполнения серии команд.

Одной из важных характеристик сетевого трафика считается распределение интервалов времени между поступлением трафика в сеть (с генерирующего трафик устройства), а также распределение интервалов времени между обслуживанием пакетов (которое обычно проводится сервером) [75, 76, 77].

Поэтому далее для перехваченного на основе экспериментов на базе модельной сети сетевого трафика проводилась дополнительная обработка экспериментальных данных, в рамках которой вычислялись значения соответствующих интервалов времени. Вычисления проводились с доверительной вероятностью 0,95.

Далее по вычисленным значениям для интенсивности поступления и интенсивности обслуживания проводилось построение гистограмм распределения вероятностей того, что интервал времени примет то или иное значение. Полученные гистограммы аппроксимировались наиболее подходящим теоретическим законом распределения.

На рисунках 51-58 представлены распределения величин интервалов времени между отправкой пакетов в сеть для трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором при использовании четырех Приложений.



Рисунок 51 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Сервера (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 1



Рисунок 52 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Клиента (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 1

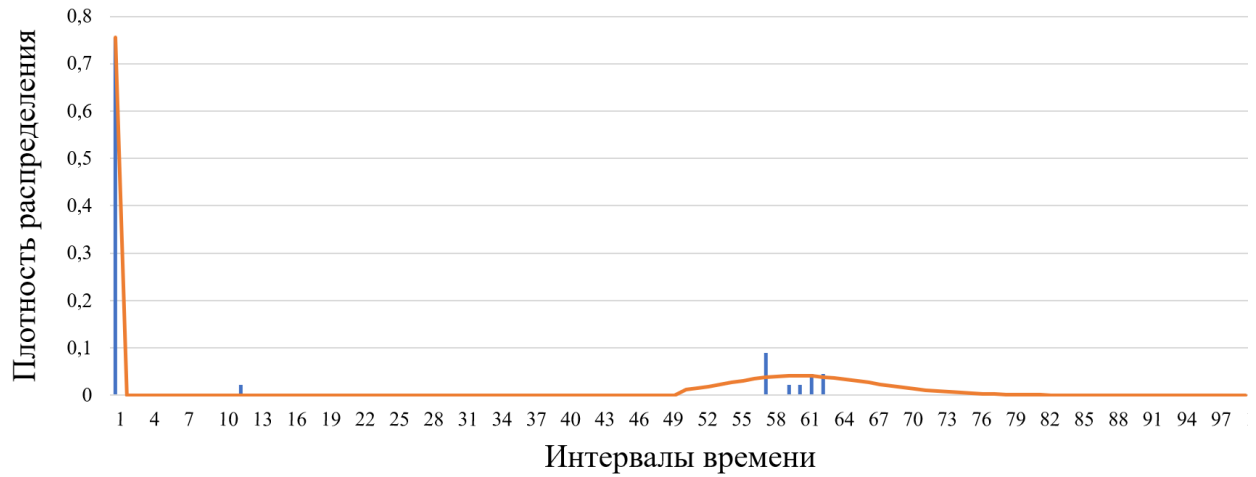


Рисунок 53 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Сервера (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 2

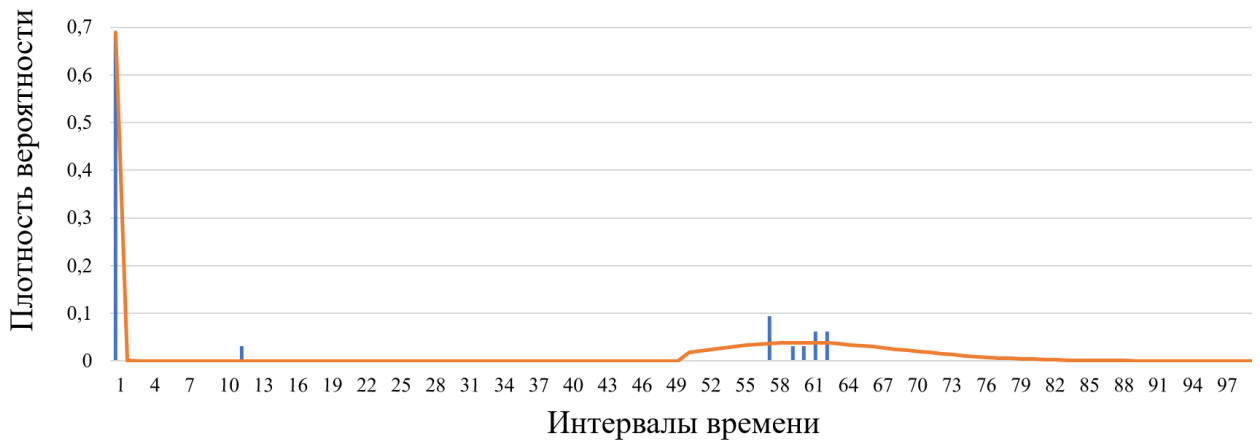


Рисунок 54 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Клиента (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 2

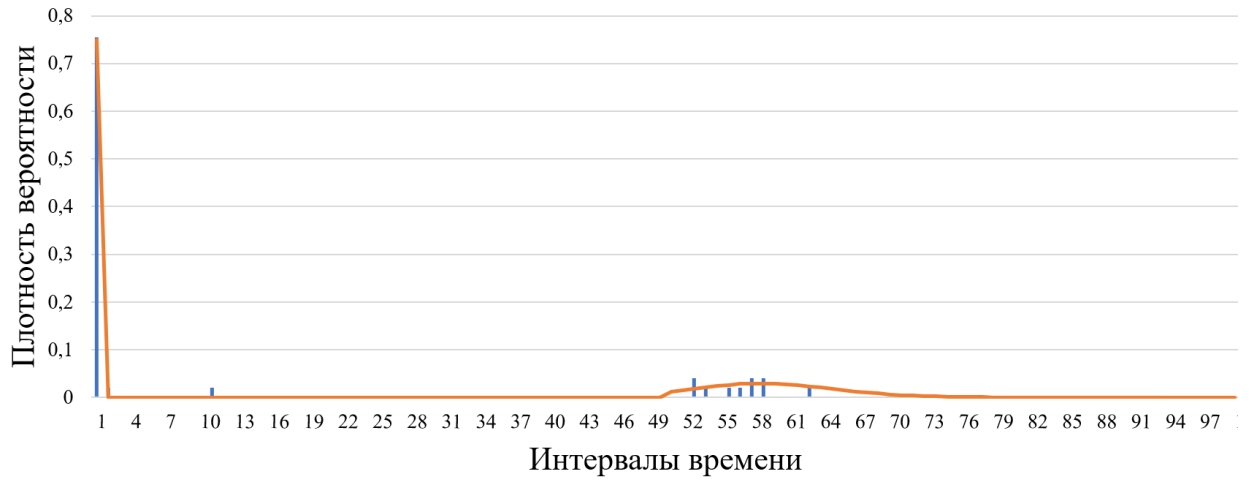


Рисунок 55 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Сервера (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 3

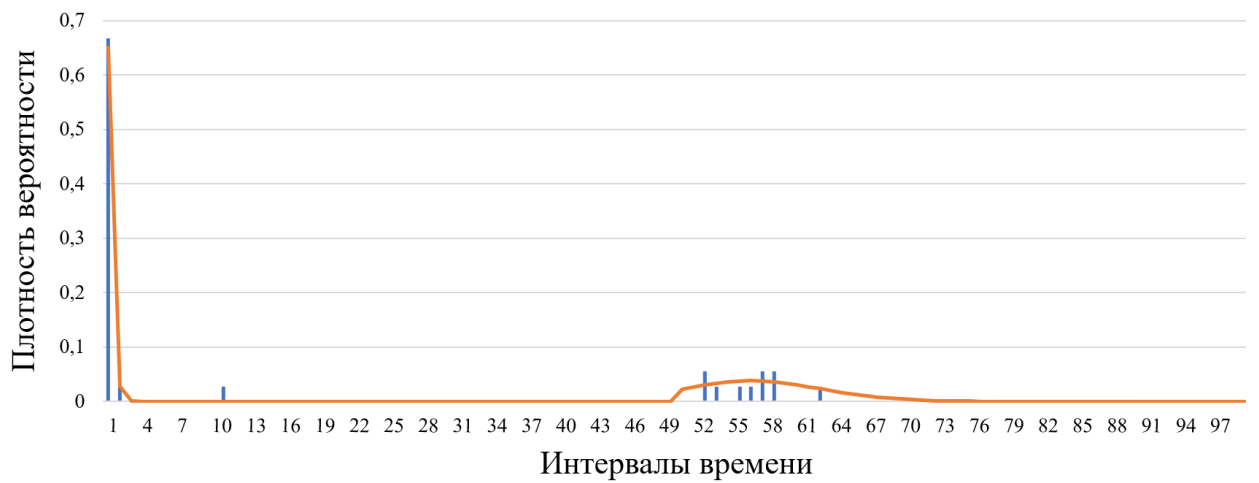


Рисунок 56 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Клиента (интервал гистограммы равен 0,5 с), Приложение 3

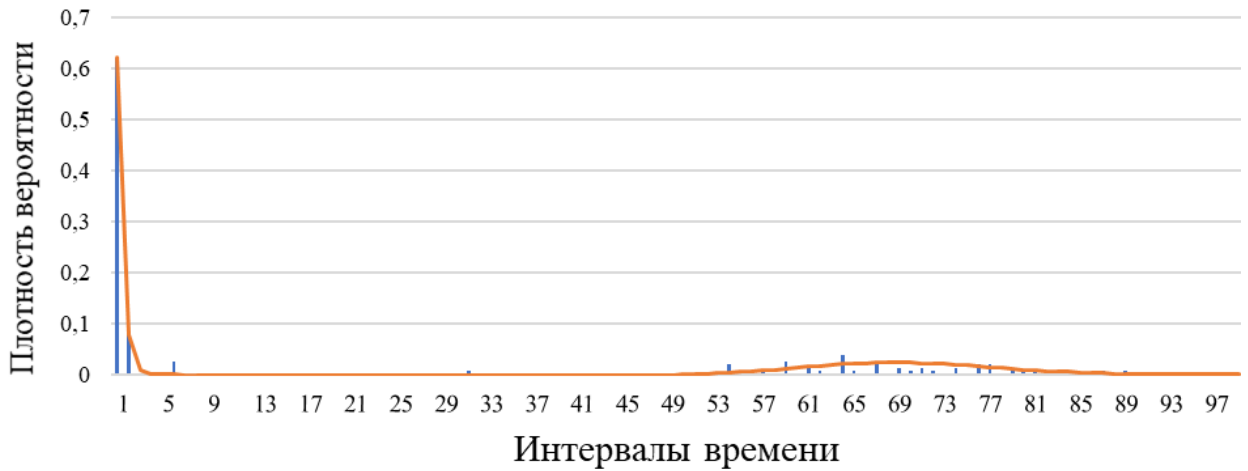


Рисунок 57 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Сервера (интервал гистограммы равен 0,1 с), Приложение 4

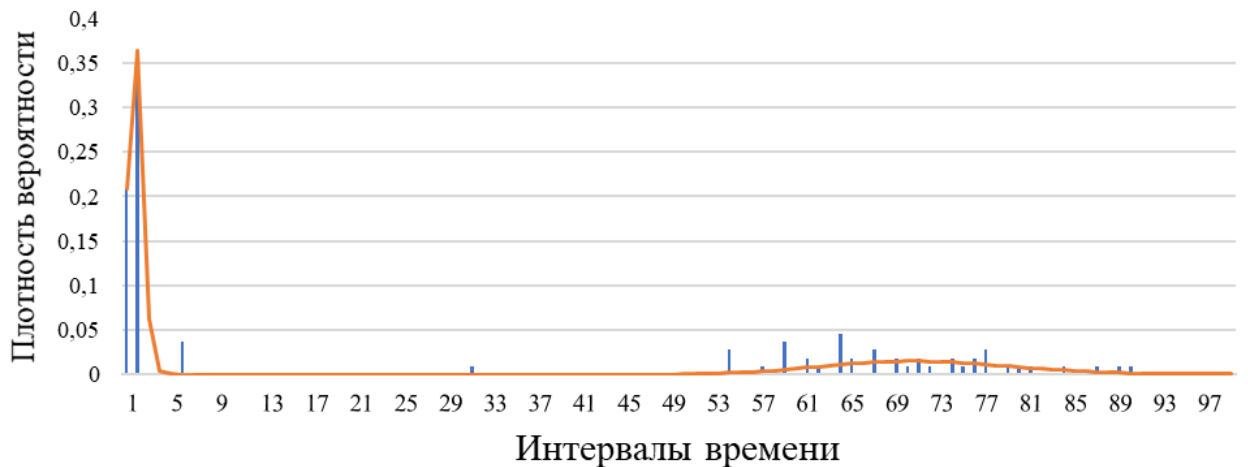


Рисунок 58 – Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от Клиента (интервал гистограммы равен 0,1 с), Приложение 4

Ввиду особенностей полученных распределений можно предположить, что данные экспериментальные распределения величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов могут быть аппроксимированы смешанным распределением, плотность вероятности которого определяется как:

$$f(x) = \eta_1 f_1(x) + \eta_2 f_2(x) \quad (16)$$

где $f_i(x)$ – плотность вероятности подходящего распределения, η_i – весовой коэффициент.

Сводные данные по полученным вероятностным распределениям представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Вероятностные распределения, описывающие интервалы времени между отправкой пакетов в сеть (для сервера и клиента)

Прил.	От сервера		От клиента	
	Распределение	Коэфф-нт	Распределение	Коэфф-нт
1	Экспоненциальное	$\lambda = 5,71;$ $\eta_1 = 0,78$	Экспоненциальное	$\lambda = 4,33;$ $\eta_1 = 0,73$
	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 64,75;$ $\beta = 0,68;$ $\eta_2 = 0,91$	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 76,88;$ $\beta = 0,56;$ $\eta_2 = 0,92$
2	Экспоненциальное	$\lambda = 20,68;$ $\eta_1 = 0,76$	Экспоненциальное	$\lambda = 14,44;$ $\eta_1 = 0,69$
	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 87,12;$ $\beta = 0,35;$ $\eta_2 = 0,67$	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 52,02;$ $\beta = 0,59;$ $\eta_2 = 0,82$
3	Экспоненциальное	$\lambda = 16,02;$ $\eta_1 = 0,75$	Экспоненциальное	$\lambda = 6,32;$ $\eta_1 = 0,68$
	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 92,01;$ $\beta = 0,32;$ $\eta_2 = 0,45$	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 92,11;$ $\beta = 0,31;$ $\eta_2 = 0,57$
4	Экспоненциальное	$\lambda = 20,69;$ $\eta_1 = 0,71$	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 5,73;$ $\beta = 0,02;$ $\eta_1 = 0,64$
	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 70,01;$ $\beta = 0,11;$ $\eta_2 = 0,51$	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 73,72;$ $\beta = 0,09;$ $\eta_2 = 0,31$

В качестве распределений для аппроксимации выбраны: экспоненциальное распределение (где λ – параметр интенсивности ($\lambda > 0$)); двухпараметрическое Гамма-распределение (где α – параметр формы ($\alpha > 0$), β – параметр скорости ($\beta > 0$)) [78, 79].

Проверка согласия полученных экспериментальных распределений и их аппроксимаций проводилась с использованием критерия согласия Колмогорова-Смирнова с поправкой Большева [80, 81].

4.7 Оценка степени самоподобия сетевого трафика

Основным свойством для анализа трафика является его оценка самоподобия, которая рассчитывается как показатель Херста (H) - параметр, характеризующий самоподобие системы и используемый в анализе временных рядов [82].

Для определения показателя Херста необходим длинный временной ряд. Показатель Херста может иметь следующие значения [82]:

- при $0 < H < 0,5$ — временной ряд не самоподобный, антиперсистентный, для него более вероятна смена направления отклонения;
- при $H = 0,5$ — временной ряд является абсолютно случайным, следующее значение не зависит от предыдущих значений;
- при $0,5 < H < 1$ — временной ряд самоподобный, персистентный.

Для перехваченного сетевого трафика был рассчитан коэффициент самоподобия (показатель Хёрста (H)) методом изменения дисперсии [83]. Расчет производился на основе интервалов времени между отправкой пакетов от сервера на клиент. Результаты оценки представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Оценка самоподобия сетевого трафика

Приложение	1 – Без модулей	2 – Вак. Захват	3 – Мех. Захват	4 – Черчение	Среднее значение	СКО
Базовый сценарий	0,41	0,49	0,53	0,58	0,5	0,07
С предложенным алгоритмом	0,59	0,56	0,56	0,48	0,55	0,05

Из результатов оценки коэффициента самоподобия (H) следует, что трафик, генерируемый при дистанционном управлении роботом-манипулятором при работе всех приложений по предложенному алгоритму (протоколу) сетевого взаимодействия, имеет более самоподобный характер, чем в базовом сценарии.

4.8 Выводы по главе

По содержанию главы можно сделать следующие выводы:

1. Предложена модель взаимодействия между системой управления и роботом-манипулятором с условием серийной передачи команд и разработан метод повышения эффективности использования ресурсов сети связи для организации их взаимодействия.

2. Описан реализованный и апробированный в ходе исследований новый алгоритм сетевого управления роботами манипуляторами. Проведен перехват и анализ сетевого трафика по новому сценарию. Установлено снижение интенсивности поступления пакетов в сеть связи, снижение используемой пропускной способности и увеличение среднего размера пакетов при условии использования предложенного алгоритма.

3. Обмен данными для роботизированной системы в сетях связи пятого и последующих поколений зависит от ее назначения и в общем случае может включать в себя как передачу единичных команд и результатов их выполнения, так и серийную передачу команд. Серийная передача позволяет повысить скорость выполнения операций, и возможности роботизированной системы.

4. Сбор статистических данных о вероятностях ошибок позволяет динамически подстраивать параметры обмена при их изменении под влиянием различных факторов, тем самым обеспечивая близкое к оптимальному использование сетевых ресурсов.

5. Разработанный метод управления параметрами обмена позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов, например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%, при этом оптимальная длина серии составляет 29 команд. Величина выигрыша повышается с ростом ошибки выполнения команд.

6. Проведена оценка коэффициента самоподобия сетевого трафика (H). Показано, что после реализации предложенного алгоритма степень самоподобия сетевого трафика возросла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований в диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. Произведен анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений. Определено, что Тактильный Интернет является предпосылкой для создания сетей связи с ультрамалыми задержками в рамках сетей связи шестого поколения, поскольку с переходом к таким сетям изменятся характеристики плотности устройств сети и круговой задержки. Такие сети обеспечат высокоскоростной и надежный доступ к данным, большую емкость и гибкость использования. Услуги телеприсутствия, в свою очередь, создают трафик, который должен быть обслужен с требуемыми характеристиками качества обслуживания.

2. Рассмотрена четвертая промышленная революция в рамках одной из главных основ технического прогресса – роботов. Их использование широко распространено на сегодняшний день на производствах, в повседневной жизни человека, при проведении научных исследований, в медицине и т.д. Они необходимы для повышения производительности и эффективности процессов производства и для выполнения рутинной работы человека в быту. Главной задачей является их управление через сеть и использование в режиме реального времени.

3. В результате проведенного анализа международных стандартов определены требования к задержкам и вероятности безотказной работы для различных услуг телеприсутствия, а также требования к характеристикам качества обслуживания в сетях связи с ультрамалыми задержками.

4. Дано определение модельной сети и рассмотрены области их применения, показана типовая структура различных типов модельных сетей, в т.ч. модельной сети для тестирования услуг Тактильного интернета.

5. Описан первоочередной набор услуг телеприсутствия, тестирование которых можно провести на базе модельной сети.

6. Рассмотрены программные, программно-аппаратные и аппаратные компоненты для реализации модельной сети. Подробно описан сам используемый в экспериментах робот-манипулятор и его технические характеристики.

7. Представлена структура модельной сети, разработанная для проведения перехвата и анализа сетевого трафика, генерируемого при дистанционном управлении роботами-манипуляторами.

8. Разработана методика тестирования системы тактильного интернета с использованием модельной сети, в т.ч. сегмента роботов-манипуляторов.

9. Рассмотрены существующие протоколы, которые используются для управления роботами.

10. Определены характеристики сетевого трафика для исследований. Описаны 4 Приложения (задачи) работы манипулятора. Представлен базовый сценарий обмена сообщениями при управлении роботом-манипулятором. На базе модельной сети перехвачен и исследован сетевой трафик. Данный подход требует значительных вычислительных затрат по контролю команд, и затрат сетевых ресурсов на обмен данными, что в совокупности приводит к вынужденным задержкам между выполнениями отдельных операций.

11. Описан порядок проведения исследования по определению степени влияния затухания в сигнале при передаче команд.

12. Проведено исследование влияния затухания на передачу команд роботу-манипулятору на разработанной модельной сети. И получены результаты по определению предельного значения расстояния в 115 км, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора в сети связи общего пользования.

13. Предложена модель взаимодействия между системой управления и роботом-манипулятором с условием серийной передачи команд и разработан метод повышения эффективности использования ресурсов сети связи для организации их взаимодействия.

14. Описан реализованный и апробированный в ходе исследований новый алгоритм сетевого управления роботами манипуляторами. Проведен перехват и

анализ сетевого трафика по новому сценарию. Установлено снижение интенсивности поступления пакетов в сеть связи, снижение используемой пропускной способности и увеличение среднего размера пакетов при условии использования предложенного алгоритма.

15. Обмен данными для роботизированной системы в сетях связи пятого и последующих поколений зависит от ее назначения и в общем случае может включать в себя как передачу единичных команд и результатов их выполнения, так и серийную передачу команд. Серийная передача позволяет повысить скорость выполнения операций, и возможности роботизированной системы.

16. Сбор статистических данных о вероятностях ошибок позволяет динамически подстраивать параметры обмена при их изменении под влиянием различных факторов, тем самым обеспечивая близкое к оптимальному использование сетевых ресурсов.

17. Разработанный метод управления параметрами обмена позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов, например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%, при этом оптимальная длина серии составляет 29 команд. Величина выигрыша повышается с ростом ошибки выполнения команд.

18. Проведена оценка коэффициента самоподобия сетевого трафика (H). Показано, что после реализации предложенного алгоритма степень самоподобия сетевого трафика возросла.

19. Проводимые исследования основываются на теории телетрафика, методах моделирования, и экспериментах на базе разработанной модельной сети. Разработанные модели и методы позволяют повысить эффективность использования ресурсов сети и качество предоставления услуги телеприсутствия. Полученные результаты могут быть использованы для проведения имитационного моделирования, совершенствования алгоритмов управления отдельными роботами или их кластерами, а также для планирования и развертывания автоматизированных производств.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

3D	3-Dimensional – трехмерная графика
3GPP	Third Generation Partnership Project – Проект партнерства третьего поколения
5G, 6G	5 or 6 Generation – 5 и 6 поколение сетей связи
AR	Augmented reality – Дополненная реальность
B	Buffer – Буфер команд
C	Controller – Контроллер управления
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны
eMBB	Enhanced Mobile BroadBand – Расширенная мобильная широкополосная связь
ETSI	European Telecommunications Standard Institute – Европейский институт стандартизации телекоммуникаций
FDM	Fused Deposition Modeling – Технология послойного наплавления
FEC	Forward Error Correction – Упреждающая коррекция ошибок
GE	Gigabit Ethernet – Гигабитный Ethernet
H2M	«Human to machine» – «Человек – машина»
HTTP	HyperText Transfer Protocol — протокол передачи гипертекста
ICMP	Internet Control Message Protocol — протокол межсетевых управляющих сообщений
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - международная общественная организация
IIoT	Industrial Internet of Things – Промышленный Интернет вещей
IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020 – Международная мобильная связь-2020
IoT	Internet of Things – Интернет вещей
IP	Internet Protocol – Протокол межсетевого взаимодействия

ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication – Международный союз электросвязи – сектор Телекоммуникаций
LLDP	Link Layer Discovery Protocol – Протокол обнаружения канального уровня
LoRa	сокр. От Long Range – «Дальний радиус действия» (название технологии)
LTE	Long-Term Evolution – стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport - упрощённый сетевой протокол
NFV	Network Function Virtualization – Виртуализация сетевых функций
OD-40	Оптический демультиплексор
OM-40	Оптический мультиплексор
OSI	Open Systems Interconnection model - модель взаимодействия открытых систем
OTN	Optical Transport Network – Оптическая транспортная сеть
OTU	Optical Channel Transport Unit – Транспортный блок оптического канала
PLA	Polylactic Acid – Полимолочная кислота (пластик для 3D-печати)
PWM	Pulse-Width Modulation – Широтно-импульсная модуляция
QoS	Quality of service – Качество обслуживания
RBC	Robo Builder Control – серийный протокол
ROS	Robot Operating System – Операционная система робота (манипулятора)
RScomm	Транспортный протокол
SDK	Software Development Kit – Среда для разработки программного обеспечения
SDN	Software Defined Network – Программно-конфигурируемые сети (Программно-определяемые сети)
SNMP	Simple Network Management Protocol — простой протокол сетевого управления

SRMP	Simple Robot Management Protocol – Простой протокол управления роботом
STM	Synchronous Transport Module – Синхронный транспортный модуль
STP	Spanning Tree Protocol – канальный протокол связующего дерева
TCP	Transmission Control Protocol – Протокол управления передачей
TD-10	Транспондер
TTL	Time to live – время жизни пакета данных в протоколе IP
UDP	User Datagram Protocol – Протокол пользовательских датаграмм
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication – Сверхнадёжная связь с ультрамалой задержкой
USB	Universal Serial Bus – Универсальная последовательная шина
VM	Virtual Machines – Виртуальная машина
Web	World Wide Web – Всемирная паутина
Wi-Fi	Wireless Fidelity – Технология беспроводной локальной сети
XMPP	Extensible Messaging and Presence Protocol - протокол обмена сообщениями и присутствия
АРУ	Автоматическая регулировка усиления
мМТС	Massive Machine Type Communication – Массивная межмашинная связь
МСЭ	Международный союз электросвязи
ПК	Персональный компьютер
ПМИ	Программа и методика испытаний
ПО	Программное обеспечение
PM	Робот-манипулятор
СС	Сеть связи
ССОП	Сети связи общего пользования
СУ	Система управления

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

b	Число команд, помещаемое в буфер; Количество команд в серии
i	Очередность команд из серии
p_{ns}	Вероятность неуспешного выполнения операции
e	Эффективность обмена данными
U	Объем полезных данных
A	Общий объем данных
S_{DC}	Размер одной команды, байт
m	Количество успешно выполненных команд
U_S	Объем полезных данных серии
k	Количество попыток (передач)
L	Количество данных в служебных сообщениях (запросах и подтверждениях) из расчета на одну серию команд
\bar{k}	Среднее количество передач серии команд
p_{er}	Вероятность ошибки выполнения команды манипулятором
$p_i^{(er)}$	Вероятность ошибки при выполнении i -й команды из серии
b^*	Максимальное значение размера серии команд
Δe	Выигрыш эффективности обмена данными
$\overline{p_{er}}$	Доверительный интервал для вероятности ошибки выполнения команды манипулятором
n	Общее количество наблюдений (выполнений операции)
n_{er}	Количество ошибок при выполнении операции
$G_{1-\alpha/2}$	Квантиль нормального распределения для доверительной вероятности $(1-\alpha/2)$.
δ	Достоверность оценки
t_D	Время доставки команд
N	Количество передаваемых команд

r	Скорость передачи данных (бит/с)
$f_i(x)$	Плотность вероятности подходящего распределения
η_i	Весовой коэффициент
λ	Параметр интенсивности
α	Параметр формы
β	Параметр скорости

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кучерявый, А.Е. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия [Текст] / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.И. Выборнова, А.С.А. Мутханна, А.Ю. Матюхин, Р.А. Дунайцев, С.С. Владимиров, О.И. Ворожейкина, М.В. Захаров, В.Д. Фам, А.В. Марочкина, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // Электросвязь. - 2022. - № 1. - С. 14-20. – DOI 10.34832/ELSV.2022.26.1.001. – EDN GBQWCV.
2. Волков, А.Н. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2020. - Том 8. № 2. - С. 32-43. - DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43.
3. Кучерявый, А.Е. Сети связи ожидает блестящее наукоемкое будущее. / А.Е. Кучерявый // Электросвязь. - 2022. - № 1. - С. 3-5.
4. 5G Пятое поколение мобильной связи [Электронный ресурс] // TADVISER : [сайт]. – 2022. – URL : <https://www.tadviser.ru/a/270048> (дата обращения: 15.06.2023).
5. Владыко, А.Г. Программируемые сети SDN /А.Г. Владыко, А.С.А. Мутханна, Р.В. Киричек, А.Н. Волков, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов. - Санкт-Петербург : Лигр , 2019. – 120 с.
6. Программно-определяемые сети Software-Defined Network, SDN [Электронный ресурс] // TADVISER : [сайт]. – 2021. – URL : <https://www.tadviser.ru/a/158716>
7. Бутенко, В.В. Сети 5G/ИМТ-2020&IoT – основа цифровой трансформации. / В.В. Бутенко, В.В. Веерпалу, Е. Девяткин, Д. Федоров. // Электросвязь. - 2019. - №12. - С. 4-9.
8. Attai Ibrahim Abubakar. The Role of Artificial Intelligence Driven 5G Networks in COVID-19 Outbreak: Opportunities, Challenges, and Future Outlook. / Attai

- Ibrahim Abubakar, Kenechi G. Omeke, Metin Ozturk, Sajjad Hussain, Muhammad Ali Imran // *Frontiers in Communications and Networks*. - Vol. 1. - pp.1-22. - Article. 575065. - Nov 2020. - URL : <https://doi.org/10.3389/frcmn.2020.575065>
9. Волков, А.Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G MEGANETLAB СПбГУТ. / А.Н. Волков, Л.С. Горбачева, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.И. Парамонов, С.С. Владимиров, Г.А. Фокин, Р.А. Дунайцев, М.В. Захаров, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // *Электросвязь*. – 2023. – № 6. – С. 5-14. – DOI 10.34832/ELSV.2023.43.6.001. – EDN GBQWCV.
 10. Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // *Электросвязь*. - 2016. — №1. — С. 45-47.
 11. Кучерявый, А.Е. Сети связи с ультрамалыми задержками / А.Е. Кучерявый // *Труды НИИР*. – 2019. - №1. – С. 69-74.
 12. Телеприсутствие [Электронный ресурс] // *АКАДЕМИК* : [сайт]. - URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1358502#> (дата обращения: 11.05.22).
 13. The Tactile Internet [Текст] // *ITU-T Technology Watch Report*. - August 2014.
 14. Ястребова, А. А. Обзор концепции тактильного интернета и технологий для его реализации. / А.А. Ястребова, А.И. Выборнова, Р.В. Киричек // *Информационные технологии и телекоммуникации*. - 2016. - Том 4. № 4. - С. 89–96.
 15. Кузнецов, К.А. Тактильный Интернет и его приложения. / К.А. Кузнецов, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // *Информационные технологии и телекоммуникации*. - 2019. - Том 7. № 2. - С. 12–20.
 16. Recommendation ITU-T Y.3106, (04/2019), Quality of service functional requirements for the IMT-2020 network. – Geneva. – 2019.
 17. Кучерявый, А.Е. Сети связи 2030 / А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, Р.В. Киричек // *Электросвязь*. – 2018. - №11. – С.52-56.
 18. Бородин, А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // *Электросвязь*. – 2017. – № 5. – С. 45-49.

19. Шваб, К. Технологии Четвертой промышленной революции: [перевод с английского] / Клаус Шваб, Николас Дэвис. - Москва: Эксмо, 2018. - 320 с.: ил. - (Top Business Awards).
20. Горбачева, Л.С. Разработка модельной сети и анализ сетевого трафика управления роботом-манипулятором / Л.С. Горбачева // Труды учебных заведений связи. – 2023. - Т. 9. № 3. - С. 75–81. – DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81.
21. Роботы и роботизированные устройства [Электронный ресурс] // ISO 8373:2012 - URL: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en:term:2.9>
22. Что могут и где применяются роботы-манипуляторы [Электронный ресурс] // TOP3DSHOP: [сайт]. – 2019. – URL : <https://top3dshop.ru/blog/manipulator-robots-features-and-applications.html>
23. Jocelyn V. Industrial robots worldwide / V. Jocelyn, L. Biagi – Текст : электронный // Statista Inc : [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.statista.com/study/14872/industrial-robots-statista-dossier/> (дата обращения: 03.05.2023).
24. Национальная Ассоциация Участников Рынка Робототехники, раздел «Аналитика» [Электронный ресурс] // НАУРР : [сайт]. – 2023. – URL : <https://robotunion.ru/services/documents> (дата обращения: 10.05.2023).
25. IRF International Federation of Robotics. [Электронный ресурс] // World Robotics 2022 [сайт]. – URL : https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf. (дата обращения 21.04.2023).
26. Z.Li. 5G URLLC: Design Challenges and System Concepts. / Z.Li, M.Uusitalo, H.Shariatmadari, B.Singh // 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). - October 8-9. – Tokyo, Japan. – 2018. – p.6.
27. 3GPP, TS 22.261 “Service Requirements for the 5G System, Stage 1 (Release 18), v.18.6.1. - June 2022.

28. Taleb T. Extremely-Interactive and Low Latency Services in 5G and Beyond Mobile Systems / Taleb T., Nadir Z., Flinck H., Song J.S. // IEEE Communications Standard Magazine. - v.5. - issue 2. - June 2021. - pp.114-119.
29. Yastrebova A. Future Networks 2030: Architecture and Requirements / Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Borodin A., Koucheryavy A. // 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). - 2018. - P. 1–8.
30. Koucheryavy, A.E. A First-Priority Set of Telepresence Services and a Model Network for Research and Education. / A.E. Koucheryavy, M.A. Makolkina, A.I. Paramonov, A.I. Vybornova, A.S.A. Muthanna, R.A. Dunaytsev, S.S. Vladimirov, O.I. Vorozheykina, A.V. Marochkina, L.S. Gorbacheva, B.O. Pankov, B.N. Anvarzhonov // DCCN. - 26-30 September 2022.
31. 3GPP TS 22.263. Service requirements for video, imaging and audio for professional applications (VIAPA); Stage 1 (Release 17). - June 2021.
32. Recommendation ITU-T Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. - 2011.
33. Recommendation Y.1541 Network performance objectives for IP-based services. Telecommunication Standardization Sector of ITU. – Geneva. - 2018.
34. G. P. Fettweis. The tactile internet: Applications and challenges. / Fettweis G. P. // IEEE Vehicular Technology Magazine. - vol. 9. - no. 1. - pp. 64–70. - 2014.
35. Maier, M. The tactile internet: vision, recent progress, and open challenges / Maier, M., Chowdhury, M., Rimal, B. P., Van, D. P. // IEEE Communications Magazine. – 2016. - 54(5). – pp. 138-145.
36. Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет / Кучерявый А.Е., Выборнова А.И. // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО-2016. - Том 1. - С. 6-11.
37. P.Popovski. Wireless Access for Ultra-Reliable Low Latency Communications. / P.Popovski and all. // IEEE Network. - v.32. - issue 2. - March-April 2018. - pp. 16-23.

38. ITU-T Technology Watch Report, “The Tactile Internet” - Aug. 2014.
39. ETSI TS 122 261 v.16.14.0, 5G; Service Requirements for the 5G System. - April 2021.
40. 3GPP, TS 22.261 “Service Requirements for the 5G System, Stage 1 (Release 17). - v.16.14.0. - 2019.
41. Васильев, А.Б. Тестирование сетей связи следующего поколения / А.Б. Васильев, Д.В. Тарасов, Д.В. Андреев, А.Е. Кучерявый – М. : ФГУП ЦНИИС, 2008. – 140 с.
42. Андреев, Д.В. Модельная сеть, как инструментарий для решения научно-технических задач / Д.В. Андреев, Д.В. Тарасов // Электросвязь. – 2008. – № 10. – С. 24-26.
43. ITU-T Recommendation Q.3900. Methods of Testing and Model Network Architecture for NGN Technical Means Testing as Applied to Public Telecommunication Networks. - М. : МСЭ-Т. – 2006. – 29 с.
44. Кучерявый, А.Е. Эволюция модельных сетей. / А.Е. Кучерявый, Р.В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2016. – Т. 4. №3. - С. 58-64.
45. ITU-T Q.3952. The architecture and facilities of a model network for Internet of things testing. — Appr. 2018-01-13. — Geneva: ITU-T. — 2018. — 14 p.
46. Бородин, А.С. Сети связи и пандемия. / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. - №5 - 2020. - С. 8-10.
47. ITU-T Q.4065. Framework of model network for tactile Internet testing. — Appr. 2021-05-14. — Geneva: ITU-T. — 2021. — 16 p.
48. Clemm A., Vega M. T., Ravuri H. K., Wauters T., Turck F. D. Toward Truly Immersive Holographic-Type Communication: Challenges and Solutions // IEEE Communications Magazine. - 2020. - V. 58. - N. 1. - P. 93–99.
49. Горбачева Л.С. Исследование влияния характеристик сети на функционирование многофункционального робота-манипулятора / Л.С. Горбачева., В.Д. Фам, А.Ю. Матюхин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. - 2022. - № 2. - С. 37-41. – DOI 10.34832/ELSV.2022.27.2.005. – EDN MPFDRA.

50. DOBOT – Промышленные и образовательные решения [Электронный ресурс] // DOBOT : [сайт]. – 2023. – URL : https://dobot.ru/series_magician (дата обращения: 10.05.2023).
51. Magician Robot [Электронный ресурс] // DOBOT-ROBOTS: [сайт]. – URL : <https://www.dobot-robots.com/products/education/magician.html>
52. Учебно-методическое пособие для учителя Dobot Magician. Образовательная инженерная платформа // Examen-technolab.ru. – Москва, 2021. – 120 с.
53. Слабуха, Н. Введение в Robot Operating System / Николай Слабуха. - Братья Вольт // DOCS.VOLTBRO: [сайт]. – URL : <http://docs.voltbro.ru/starting-ros/ros-about.html>
54. Обзор настольного робота DoBot Magician [Электронный ресурс] // TOP3DSHOP: [сайт]. – 2018. – URL : <https://top3dshop.ru/blog/obzor-dobot-magician.html>
55. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Юбилейное издание. – СПб.: Питер, 2020. – 1008 с.: ил. – (Серия «Учебник для вузов»).
56. DWDM-СИСТЕМА «ВОЛГА» I ТЕЛЕКОМ [Электронный ресурс] // Т8: [сайт]. – URL : https://t8.ru/?page_id=3600
57. Листвин, В.Н. DWDM системы / В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков. – М.: Техносфера, 2015. – С.8-10.
58. Цифровой переменный оптический аттенюатор FHA2S01 [Электронный ресурс] // Оптические Телекоммуникации: [сайт]. – URL : <https://optel.ru/passivnie-komponenti-vols/volokonno-opticheskie-attenjuatori/cifrovie-opticheskie-attenjuatori/cifrovoj-opticheskij-attenjuator-serii-fha>
59. Коммутаторы DES-1210-28/ME [Электронный ресурс] // DLINK: [сайт]. – URL : <https://dlink.ru/ru/products/1/1617.html>
60. Выбор анализатора сетевого трафика, производительности сети и приложений [Электронный ресурс] // Связь Комплект: [сайт]. – URL :

https://skomplekt.com/vybor_analizatora_setevogo_trafika_proizvoditelnosti_seti_i_prilozhenij/

61. Костромицкий, А.И. Обзор программ анализа и мониторинга сетевого трафика. / А.И. Костромицкий, В.С. Волотка // MATHENGLISH: [сайт]. – URL : <http://pi.314159.ru/volotka/volotka1.htm>
62. Wireshark [Электронный ресурс]: Wireshark Foundation, 2021. – URL : <https://www.Wireshark.org> (дата обращения: 31.07.2023).
63. Холмогоров, В. Сниферы и не только. Выбираем инструмент для перехвата и анализа трафика [Электронный ресурс] // ХАКЕР: [сайт]. – 2021. – URL : <https://haker.ru/2021/05/17/sniffers-windows/#hakercut>
64. Горбачева, Л.С. Модели показателей качества обслуживания для трафика (роботов-манипуляторов). / Л.С. Горбачева, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2022. – Т.10, №3. – С. 13-19. – DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-3-13-19. – EDN VLDSOQ.
65. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование новых принципов построения сетей связи 6G и предоставления перспективных услуг телеприсутствия». А.Е Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.И. Выборнова, А.С.А. Мутханна, А.Ю. Матюхин, Р.А. Дунайцев, В.С. Елагин, Н.А. Чистова, Р.И. Пупцев, О.И. Ворожейкина, А.В. Марочкина, Л.С. Горбачева, Е.В. Макарова, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов, Н.И. Карташова, Н.Н. Громова. – СПб. – 2022.
66. Алзагир, А.А. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений. / А.А. Алзагир, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2022. – № 6. – С. 2-7. – DOI 10.34832/ELSV.2022.31.6.001. – EDN XAWJRS.
67. Печников, А.Л. Удалённое управление роботом посредством хтtrp-протокола. / А.Л. Печников, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин // КБ Автоматика : [сайт]. – 2013. – URL : <http://kb-au.ru/wp-content/uploads/AaSI-2013-12-XX.pdf>

68. Как мы сделали роботов, которыми можно управлять через интернет. Робохоккей онлайн [Электронный ресурс] // HABR: [сайт]. – URL : <https://habr.com/ru/amp/publications/735304/>
69. Рыжиков, А.А. Разработка бортовой системы управления мобильного робота / А.А. Рыжиков [Электронный ресурс] // 2019. - URL : https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/126905/diplomnaya_rabota_ryzhikov_0.pdf?sequence=1
70. Андроидные роботы Robobuilder 5720T [Электронный ресурс] // NANOJAM: [сайт]. – URL : <https://nanojam.ru/products/robobuilder-5720t>
71. Горбачева, Л.С. Метод оптимального использования сетевых ресурсов для робота-манипулятора / Л.С. Горбачева // Электросвязь. – 2023. – № 5. – С. 10-15. – DOI. – EDN.
72. Вадзинский, Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
73. Ван дер Варден, Б.Л. Математическая статистика. / Б.Л. Ван дер Варден. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 435 с.
74. Таненбаум Э., Фимстер Н., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 6-е изд. – СПб.: Питер, 2023. – 992 с.: ил. – (Серия «Классика computer science»). – ISBN 978-5-4461-1766-6
75. Лихтциндер, Б. Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). – М.: Горячая Линия - Телеком, 2019. – 290 с.: ил. – ISBN 978-5-9912-0742-3.
76. Поршневу, С. В. Математические модели информационных потоков в высокоскоростных магистральных интернет-каналах. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2016. – 232 с.: ил. – ISBN 978-5-9912-0508-5.
77. Степанов С.Н., Степанов М.С. Модели и методы оценки характеристик передачи данных. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2023. – 176 с.: ил. – ISBN 978-5-9912-1038-6.

78. Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. – СПб.: Наука. – 2001. – 295 с.
79. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва : Физматлит, 2006. – 816 с.
80. Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 . Госстандарт России. – Москва, 2001. – 140 с.
81. Лемешко, Б. Ю. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим: Методические рекомендации. Часть II. Непараметрические критерии / Б. Ю. Лемешко, С. Н. Постовалов – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 85 с. (С. 90 – с дополнениями).
82. Боровиков, И. М. Показатель Хёрста: способы, расчеты и возможности использования в задачах портфельного инвестирования / И. М. Боровиков, Т.В. Куликова, В.И. Тинякова // Современная экономика: проблемы и решения. — № 10 (22). — 2011. — 181 с. — С. 125–143.
83. Шелухин, О.И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О.И. Шелухин, А.В. Осин, С.М. Смольский; под ред. О.И. Шелухина. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с. – ISBN 978-5-9221-0949-9. – EDN RYRTGB.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ УСЛУГ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ, ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫХ НА ОСНОВЕ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ НА БАЗЕ МОДЕЛЬНОЙ СЕТИ

1. Программа испытаний

1.1 Общие положения

Программа и методика испытаний (тестирования) услуг телеприсутствия предоставляемых на основе роботов-манипуляторов на базе модельной сети разработана с учётом следующих государственных стандартов:

- ГОСТ 19.301-79 «Программа и методика испытаний, требования к содержанию и оформлению»;
- ГОСТ Р 2.106-2019 «Единая система конструкторской документации. Текстовые документы»;
- ГОСТ Р 15.301-2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство».

Данная программа и методика испытаний (далее – ПМИ) предназначена для проведения испытаний (тестирования) и различного рода исследований, в т.ч. определения параметров работы технических систем и их компонентов, а также перехвата пакетов данных, передаваемых по сети связи в процессе предоставления услуг телеприсутствия на основе роботов-манипуляторов.

Представленная ПМИ может использоваться учеными и исследователями, специалистами по разработке, внедрению и обеспечению предоставления услуг телеприсутствия на основе роботов-манипуляторов. При необходимости ПМИ

может обобщаться и уточняться для проведения испытаний любых типов услуг телеприсутствия.

1.2 Объект испытаний и его назначение

Объектом испытаний является техническая система и/или входящие в её состав компоненты, предназначенные для предоставления услуг телеприсутствия во взаимодействии с сетевой и серверной инфраструктурой сетей связи общего пользования (далее – ССОП).

1.3 Цель и задачи испытаний

Целью испытаний является исследование и тестирование технических систем и/или их компонентов, обеспечивающих предоставление услуги телеприсутствия.

Задачами испытаний являются:

- Проверка заявленных производителем технических характеристик;
- Исследование особенностей работы технических систем и/или их компонентов, в различных режимах работы;
- Оценка влияния действующих значений параметров QoS на предоставление услуг телеприсутствия на основе ССОП;
- Отладка прикладного ПО, обеспечивающего предоставление услуг телеприсутствия;
- Перехват генерируемых в процессе предоставления услуги телеприсутствия пакетов данных для их последующего углубленного анализа.

1.4 Перечень предъявляемых на испытания документов

Документация и материалы, используемые при проведении испытаний:

- Согласованная и утвержденная ПМИ;
- Протокол проведения испытаний;
- Схемы модельной сети (в т.ч. структурная, функциональная и т.д.);
- Описание и/или техническая документация на испытываемые технические системы и их компоненты;
- Описание и/или техническая документация на используемое при проведении испытаний и тестирования программное, аппаратное и программно-аппаратное обеспечение и другие технические средства.

1.5 Место проведения испытаний

На территории ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича" в научно-исследовательской лаборатории «Исследования сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» (MEGANETLAB 6G)¹.

¹ <https://www.sut.ru/meganetlab>

1.6 Общие требования к условиям и обеспечению проведения испытаний

Испытания должны проводиться в соответствии с ГОСТ 22261-94 «Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия».

Для проведения испытаний необходимо обеспечить следующие условия:

- Температура окружающего воздуха: 20 ± 5 °С;
- Относительная влажность: от 30 до 80%;
- Атмосферное давление: от 84 до 106 кПа;
- Частота электросети: 50 ± 1 Гц;
- Напряжение сети электропитания (переменного тока): 220 ± 22 В.

1.7 Требования безопасности

При проведении испытаний необходимо обеспечить соблюдение требований безопасности, установленных в ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности», «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей».

Для этого при необходимости провести ознакомление персонала с соответствующими нормативно-правовыми документами и последующее обучение работе с соответствующим оборудованием и т.д. Результаты ознакомления и обучения фиксируются в специальном журнале.

1.8 Материально-техническое обеспечение испытаний

Для проведения испытаний, согласно представленной ПМИ, должно использоваться следующее материально-техническое обеспечение или его аналоги²:

- Смартфон с ОС Android 5.0 (и выше) или ОС iOS 10 (и выше);
- Робот-манипулятор;
- Сетевое оборудование с поддержкой технологий IEEE 802.3, IEEE 802.11 b/g/n и т.д. (маршрутизаторы, коммутаторы);
- ПК / ноутбук с установленной и настроенной ОС семейства MS Windows или ОС семейства Linux в качестве контроллера;
- ПК / ноутбук с установленной и настроенной ОС семейства MS Windows или ОС семейства Linux в качестве сервера;
- Программный анализатор сетевого трафика Wireshark;
- и прочее.

Допускается замена отдельных компонентов на аналогичные, обеспечивающие проведение требуемого объема испытаний с заданной точностью проведения измерений.

² Вариативно, в зависимости от конкретной конфигурации модельной сети и перечня проводимых испытаний.

1.9 Объем испытаний

Перечень испытаний и тестирования услуг телеприсутствия в рамках настоящей ПМИ приведен в табл. А1.

Таблица А1 – Перечень испытаний

№	Наименование испытаний	Пункт методики	Примечание
1	Проверка комплектности	2.2	
2	Проверка соответствия технической документации	2.3	
3	Проверка схемы подключения	2.4	
4	Проверка возможности калибровки и самонастройки	2.5	
5	Проверка электропитания	2.6	
6	Перехват сетевого трафика ³	2.7	

Настоящая ПМИ, как и структура модельной сети, могут корректироваться и дополняться при подготовке и в ходе проведения испытаний.

³ Перехват генерируемого сетевого трафика осуществляется с целью более глубокого изучения системы и её технических характеристик.

2. Методика испытаний

2.1 Подготовка к испытаниям

Перед началом проведения испытаний необходимо проверить помещение лаборатории на соответствие требованиям условий обеспечения и проведения испытаний, проверить перечень предъявляемых на испытания документов и материалов, а также материально-техническое обеспечение испытаний на соответствие требованиям настоящей ПМИ.

Следует убедиться в том, что все узлы, соединяющие их кабели и т.д. модельной сети соединены согласно представленным схемам, находятся в исправном состоянии, не имеют видимых повреждений и функционируют в предусмотренных режимах работы.

Следует убедиться в том, что узлы модельной сети, для которых это предусмотрено, подключены к сети электропитания 220 В и 50 Гц.

Все замеченные в ходе подготовки и проведения испытаний особенности работы оборудования, измеренные значения параметров, промежуточные итоги по каждому пункту методики и общие результаты, а также другая информация о ходе проведения испытаний фиксируются в протоколе проведения испытаний.

2.2 Проверка комплектности

Проверку комплектности технической системы выполнить сличением состава наличного оборудования и дистрибутивов ПО с составом, заявленным производителем.

Проверку считать выполненной, если состав оборудования и дистрибутивов ПО соответствуют заявленным производителем.

2.3 Проверка соответствия технической документации

Проверку соответствия выполнить путем сличения характеристик наличного оборудования и дистрибутивов ПО, входящих в состав технической системы и обозначенных на наклейках, шильдиках и других информационных надписях непосредственно на оборудовании, и характеристик оборудования, представленных непосредственно в технической документации.

Далее необходимо оценить качество сборки, проверить соответствие габаритных размеров и массы, наличие органов управления и т.д. заявленным разработчиком в представленной технической документации.

Проверку считать выполненной, если характеристики технической системы и/или её компонентов соответствуют характеристикам, представленным в технической документации.

2.4 Проверка схемы подключения

Для выполнения проверки включить компоненты технической системы, активировать необходимые сетевые интерфейсы на сетевом оборудовании и смартфоне, с помощью прикладного ПО и органов управления устройствами установить необходимые соединения.

Проверку считать выполненной, если произошла успешная установка соединений между оборудованием технической системы и система функционирует исправно.

2.5 Проверка возможности калибровки и самонастройки

Для выполнения проверки в прикладном ПО робота-манипулятора, установленном на сервере, выбрать пункт меню, отвечающий за калибровку и самонастройку. Выполнить рекомендуемые производителем инструкции по калибровке и самонастройке робота-манипулятора.

Далее необходимо проконтролировать движения робота манипулятора во время калибровки и самонастройки. В ходе калибровки и самонастройки не должно возникать нехарактерных звуков и запахов, движения робота-манипулятор должны быть плавные и без прерываний. Необходимо оценить собранную в ходе калибровки и самонастройки робота-манипулятора статистику и удостовериться, что калибровка и самонастройка прошла успешно.

Проверку считать выполненной, если калибровка и самонастройка робота-манипулятора прошли успешно.

2.6 Проверка электропитания

Если производителем в технических характеристиках указывается диапазон значений рабочих напряжений сети переменного тока, например, 187 до 242 В, то следует провести проверку работы компонентов системы при граничных значениях этого диапазона.

Проверка производится поочередно для каждого компонента, для которого производителем указан рабочий диапазон напряжений. Тестирование более чем одного компонента за один раз запрещено.

Для проведения проверки необходимо подключить проверяемое оборудование из состава системы через регулируемый автотрансформатор. Далее

необходимо включить компонент технической системы предоставления услуг телеприсутствия и активировать предоставление услуги.

Далее на выходе автотрансформатора установить по очереди минимально и максимально допустимые значения напряжения и проверить функционирование проверяемого компонента и системы в целом.

Проверку считать выполненной, если оборудование из состава системы нормально функционирует при минимальном и максимальном значении напряжения, заявленного производителем.

2.7 Перехват сетевого трафика

Проверку провести следующим образом:

- 1) Включить компоненты системы предоставления услуг телеприсутствия.
- 2) На ПК, выступающем в роли сервера или контроллера, запустить программный анализатор трафика Wireshark. Выбрать сетевой интерфейс, с помощью которого осуществляется передача пакетов данных на другие компоненты системы. Начать перехват сетевого трафика.

- 3) Осуществить предоставление услуг телеприсутствия в течении интервала времени не менее 5-10 минут. В ходе эксперимента непрерывно оценивать качество работы системы и её компонентов, обнаруженные помехи и «артефакты»⁴, а также отклонения от нормального режима работы оборудования фиксировать в протоколе проведения испытаний.

⁴ Часто в IT под этим термином понимают заметные искажения изображения, звука, видео, вызываемые сжатием данных с потерями, нестабильной работой оборудования или его компонентов, наличием потерь пакетов, высоких значений сетевых задержек и джиттера в канале связи.

4) Удостовериться в перехвате необходимого количества сгенерированных пакетов данных, иначе продолжить перехват. Выборка должна составлять не менее 1000 пакетов. Для верной оценки размера выборки рекомендуется использовать фильтрацию перехваченного трафика.

5) Остановить перехват сетевого трафика на интерфейсе. Накопленные пакеты данных сохранить в отдельный файл на ПК. Наименование и текущее расположение файла внести в протокол проведения испытаний.

Перехват генерируемого в процессе предоставления услуги телеприсутствия сетевого трафика считать выполненным, если в результате перехвата было накоплено не менее 1000 сетевых пакетов и сохранение пакетов в файл прошло успешно.

2.8. Проверка возможности подключения собственных программных компонентов для управления роботом-манипулятором

Если производителем в технических характеристиках робота-манипулятора описана возможность использования API для разработки и подключения дополнительных программных модулей, необходимо провести тестирование описанной возможности. Для этого следует:

1) Установить рекомендуемую производителем среду разработки, в противном случае для написания программного кода рекомендуется использовать открытое и свободно-распространяемое ПО;

2) Написать программный код, реализующий поступление команд управления, а также алгоритм их поступления на робот-манипулятор, на языке программирования, заявленном разработчиком, а также с учетом требований API;

3) Произвести отладку программного кода средствами среды разработки, после чего запустить выполнение программного кода на сервере;

4) Оценить процесс выполнения программного кода, в т.ч. средствами среды разработки, а также путем визуального и технического контроля выполнения роботом-манипулятором поступающих с сервера команд управления, а также алгоритм их поступления.

5) По завершении выполнения поступивших команд управления робот должен вернуться в исходное состояние. Проверить исправное состояние робота и его готовность к работе с помощью индикации и интерфейса ПО на сервере.

Проверку считать выполненной, если разработанный программный код, реализующий команды управления роботом-манипулятором, выполняется успешно, а после его выполнения робот возвращается в исходное состояние.

2.9. Проверка возможности управления роботом-манипулятором с помощью смартфона

Если производителем в технических характеристиках робота-манипулятора описана возможность дистанционного управления роботом-манипулятором с помощью смартфона, необходимо провести проверку описанной возможности. Для этого следует:

1) Включить сетевое оборудование из состава сети доступа и опорной сети, после чего проверить работоспособность сети штатными средствами;

2) Включить робот-манипулятор, для чего нажать кнопку включения, отвести роботизированную руку в начальное положение и проверить наличие соответствующей индикации;

3) Проверить наличие подключения робота-манипулятора клиенту, а также подключение между клиентом и сервером. При необходимости провести калибровку робота-манипулятора.

4) Включить смартфон и запустить на нем специализированное ПО. Проверить подключение смартфона к сети доступа.

5) В ПО на смартфоне ввести соответствующие команды управления и инициализировать их выполнение. Проконтролировать выполнение команд управления роботом-манипулятором, а также алгоритм их поступления.

Проверку считать выполненной, если после введения команд управления в специализированном ПО на смартфоне, соответствующие команды управления поступают на робот-манипулятором и успешно выполняется, после чего робот-манипулятор возвращается в исходное состояние.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ВНЕДРЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232
Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159
<http://sut.ru>
E-mail: rector@sut.ru
ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635
ИНН 7808004760 КПП 784001001
ОКТМО 40909000

12.05.2023 № 01
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе,
канд.техн.наук



Брусиловский
Сергей Александрович

Акт

о внедрении научных результатов, полученных Горбачевой Любовью Сергеевной
в диссертационной работе «Исследование характеристик трафика и качества
обслуживания для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми
задержками»

Комиссия в составе декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем Д.В. Окуневой, доцента кафедры сетей связи и передачи данных Р.А. Дунайцев и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О.И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные результаты, полученные Горбачевой Любовью Сергеевной, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Тактильный Интернет и интернет навыков» (Рабочая Программа регистрационный номер №_22.05/447-Д), разделы Программы:

- Приложения Тактильного интернета;
- Тактильный интернет: новые требования к сетям связи;
- Тактильный интернет: качество обслуживания.

2. При чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Сети связи с ультрамалыми задержками» (Рабочая Программа регистрационный номер № 22.05/450-Д), раздел Программы:

- Изучение принципов построения сетей с ультрамалыми задержками;
- Анализ основных источников задержки на канальном уровне и методы уменьшения задержки.

3. При чтении лекций проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (Рабочая Программа регистрационный номер №_21.05/780-Д), раздел Программы:

- Основные задачи построения и эксплуатации систем, сетей и устройств связи;

- Эффективность функционирования (использования) систем, сетей и устройств связи.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Горбачевой Любовью Сергеевной в диссертационной работе:

- Роботы-манипуляторы устойчиво функционируют на сети связи общего пользования для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при предельном значении расстояния в 115 км от передатчика команд управления по протоколу UDP, что уточняет требования стандартов международных организаций.

- Определены характеристики трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента.

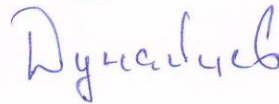
- Метод управления параметрами обмена и протокол прикладного уровня для роботов-манипуляторов, которые для управления роботами по сети связи общего пользования используют передачу серии команд, число которых оптимизировано по эффективности использования канала связи, позволяют повысить эффективность использования сетевых ресурсов, например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%.

Декан факультета ИКСС
к.т.н., доцент



Д.В. Окунева

Доцент кафедры ССиПД
к.т.н., PhD



Р.А. Дунайцев

Зав. лабораторией кафедры ССиПД



О.И. Ворожейкина



Утверждаю
Заместитель генерального директора
ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ»

А.Б. Васильев

15.09.2023

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Горбачевой Любови Сергеевны на тему “Исследование характеристик трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками”

Настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Горбачевой Любови Сергеевны “Исследование характеристик трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками”, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в ПАО “ГИПРОСВЯЗЬ” при разработке “Методики планирования сетей связи при внедрении роботов-манипуляторов”.

При разработке были использованы следующие новые научные результаты из диссертации Л.С.Горбачевой:

- Характеристики трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного

захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента,

- Метод управления параметрами обмена и протокол прикладного уровня для роботов-манипуляторов, который для управления роботами по сети связи общего пользования использует передачу серии команд, число которых оптимизировано по эффективности использования канала связи, позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов, например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%.

Председатель комиссии:

Директор департамента



А.А. Иванов

Члены комиссии:

Главный специалист



Ю.А. Нопина



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский
институт радио имени М.И. Кривошеева»
(ФГБУ НИИР)

Почтовый адрес: Казакова ул., д. 16, Москва, 105064
Телефон: (495) 647-17-77, факс: (499) 261-00-90
E-mail: info@niir.ru, <http://www.niir.ru>
ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827
ИНН/КПП 9709082715/770901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель генерального
директора ФГБУ НИИР, кандидат
технических наук



М.Ю. Слодобаев

2023 г.

№

На № _____ от _____

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Горбачевой Любови Сергеевны на тему «Исследование характеристик трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15– Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

Председатель зам. директора НТЦ Анализа ЭМС С.Ю. Пастух, к.т.н.
комиссии –

Члены комиссии – зам. начальника отдела НТЦ Анализа ЭМС Е.В. Тонких, к.т.н.
начальник отдела НТЦ Анализа ЭМС Н.В. Варламов,

установила, что в диссертационной работе Горбачевой Любови Сергеевны, ассистента кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М.А. Бонч-Бруевича на тему «Исследование характеристик трафика и качества обслуживания для роботов-

манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками» получены новые научные результаты, которые внедрены в 2023 г. в рамках выполнения государственного контракта по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций администрации связи Российской Федерации в части, касающейся международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложения (вклада) от имени администрации связи Российской Федерации (Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

Эти вклады представлены на заседании Исследовательской комиссии 11 (ИК11) «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации испытаний и борьба с контрафактными устройствами электросвязи/ИКТ» МСЭ-Т, прошедшей в период с 10 мая по 20 мая 2023 года, в качестве документов для разработки нового направления исследования: «Предложение по инициированию нового направления исследований - Q.TSN «Тестирование робототехники на модельной сети (The testing of the robotics on the model network)» (вклад С194R1) и «Базовый текст проекта Рекомендации МСЭ-Т Q.TSN «Тестирование робототехники на модельной сети» (вклад С195R1).

Вышеуказанные вклады определили позицию Администрации связи Российской Федерации на заседаниях ИК11 МСЭ-Т по тестированию роботов как конечных устройств сетей последующих поколений и являются основой для разработки соответствующей рекомендации Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи.

Председатель комиссии



С.Ю. Пастух

Члены комиссии



Е.В. Тонких



Н.В. Варламов

Подписи С.Ю. Пастуха, Тонких Е.В., Н.В. Варламова заверяю.

Начальник отдела кадров ФГБУ НИИР



Е.П. Буянова