

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УДК 004.733

Дзюба Андрей Всеволодович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СОТОВЫХ СЕТЕЙ ПО
КРИТЕРИЮ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (по отраслям) (технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Червинский В.В.

Идентичность всех экземпляров

ПОДТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 01.024.04

кандидат технических наук, доцент



Т.В. Завадская

Донецк – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ LTE	11
1.1 Общее описание гетерогенных сетей LTE четвёртого поколения	11
1.1.1 Развертывание Indoor	14
1.1.2 Развертывание Outdoor	15
1.2 Анализ исследований по сокращению потребления энергии в сотовых сетях	19
1.3 Формализация задачи энергопотребления в гетерогенной сети LTE	29
1.4 Постановка задачи диссертационного исследования	35
1.5 Выводы по разделу	36
РАЗДЕЛ 2 ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА СОТ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ LTE КРУПНОГО ГОРОДА	37
2.1 Описание объекта исследования.....	37
2.2 Критерии выбора сот в гетерогенной сотовой сети	45
2.2.1 Критерий выбора сот на основе расстояния.....	47
2.2.2 Критерий выбора сот по уровню сигнал/шум	49
2.2.3 Критерий выбора сот по полосе пропускания	54
2.2.4 Критерий выбора сот по энергосбережению	58
2.3 Моделирование критериев выбора сот для условий гетерогенной сети центра крупного города	63
2.4 Выводы по разделу	69
РАЗДЕЛ 3 ОПТИМИЗАЦИЯ СОКРАЩЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ LTE ДЛЯ УСЛОВИЙ КРУПНОГО ГОРОДА	71
3.1 Анализ стратегий управления ресурсами системы базовых станций	71
3.1.1 Категории пользователей и показатели качества канала в сетях LTE	71

3.1.2 Анализ влияния распределения ресурсов для абонентов на потребление электроэнергии базовыми станциями	73
3.2 Модель снижения энергопотребления с пошаговым диммированием	81
3.3 Выводы по разделу	89
РАЗДЕЛ 4 МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ LTE С УЧЕТОМ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ	91
4.1 Анализ методик планирования гетерогенных сотовых сетей	91
4.2 Критерий оптимизации расположения базовых станций в гетерогенной сети сотовой связи LTE с учетом минимизации капитальных затрат и качества обслуживания	93
4.3 Развертывание гетерогенной сети LTE в условиях крупного города	97
4.4 Результаты моделирования	101
4.5 Анализ энергооптимизации в гетерогенной сотовой сети	103
4.6 Экономический эффект от энергосбережения	113
4.7 Выводы по разделу	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Продолжающееся увеличение количества мобильных устройств приводит к значительному увеличению объема информации передаваемой между ними. Особенно ярко эта тенденция проявляется в крупных городах. В них регулярно возникают места массового скопления людей, в результате чего периодически резко возрастает нагрузка на базовые станции, обслуживающие абонентские устройства. Как правило, это происходит вблизи железнодорожных и автовокзалов, торговых центров, стадионов, мест проведения массовых мероприятий и в центральных районах городов. Решить задачу качественного обслуживания абонентов в таких условиях могут гетерогенные сети четвертого поколения стандарта Long Term Evolution (LTE).

Гетерогенные сети LTE состоят из сот различного размера. Макросоты обеспечивают глобальное покрытие. Пико- и микросоты используют для увеличения ёмкости в общественных местах скопления людей. Кроме того, существуют фемтосоты, покрывающие офисные и жилые помещения. Развёртывание малых сот является ключевой особенностью гетерогенных сетей и обеспечивает их гибкость.

Значительные расходы электроэнергии являются серьезной проблемой во многих системах. В последнее время вопросы потребления электроэнергии играют все более важную роль и в сотовых сетях. Большинство предложенных решений по повышению энергетической эффективности сотовых сетей основаны на принципе исключения той части системы, которая потребляет наибольшее количество электроэнергии. Например, на временном отключении или уменьшении потребляемой мощности базовых станций.

Такой подход особенно актуален для гетерогенных сетей LTE, развёрнутых в местах периодического массового скопления людей. При этом основным фактором, влияющим на энергопотребление базовыми станциями является текущая информационная нагрузка на сеть, которая может колебаться в широком

диапазоне в зависимости от количества активных абонентов и затребованных ими инфокоммуникационных услуг.

Таким образом, повышение эффективности энергосбережения в перспективной городской гетерогенной сотовой сети LTE на основе оптимизации потребления энергии базовыми станциями является актуальной задачей, имеющей большое значение для телекоммуникационной отрасли.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам энергосбережения в сетях сотовой связи посвящено большое количество научных работ отечественных и зарубежных ученых М. Дерюжка, Э. Эмбрози, С. Бойарди, К. Самданиса, Д. Кутчера и М. Бруннера. В большинстве публикаций отмечают, что подсистема базовых станций сотовой сети потребляет наибольшее количество электроэнергии. В проведенных исследованиях предлагается несколько путей энергосбережения: отключать базовые станции, использовать соты меньшего размера, частично отключать услуги, при наличии нескольких базовых станций в районах с высокой плотностью населения отключать одну из них в периоды низкой нагрузки.

Проведенные с использованием теории систем исследования рассматривают способы повышения энергоэффективности сети за счет отключения части оборудования. Такой подход не учитывает причины увеличения энергопотребления. Одной из них является повышение требований к предоставляемым абонентам услугам. В таких условиях использование стандартных методов регулирования нагрузки на сеть может ограничить возможности снижения энергопотребления сетью.

На основании вышеприведенного можно сказать, что существующие методы энергосбережения для сетей сотовой связи LTE не учитывают возможность системного управления для гетерогенных сетей

Цель и задачи исследования. Цель работы – повышение эффективности функционирования перспективной городской гетерогенной сотовой сети LTE на основе оптимизации потребления энергии базовыми станциями путем анализа их

загрузки, детерминирования их выключения и диммирования в сочетании с актуализацией критерия выбора сот абонентским оборудованием.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Определить факторы, влияющие на системные показатели эффективности функционирования гетерогенных сотовых сетей LTE.

2. Разработать математическую модель информационных и технологических процессов в гетерогенных сотовых сетях LTE, влияющих на показатели энергопотребления базовых станций и уровни качество обслуживания абонентов.

3. Разработать критерий оптимизации функционирования гетерогенной сотовой сети LTE с точки зрения минимизации энергопотребления с учетом обеспечения заданного качества обслуживания.

4. Разработать метод планирования гетерогенной сотовой сети LTE на основе критерия структурной оптимизации с учетом плотности абонентов и типов зон обслуживания при обеспечении заданного уровня качества обслуживания.

5. Провести вычислительный эксперимент по практическому использованию разработанных методов и проанализировать полученные результаты.

6. Разработать рекомендации по использованию предложенных методов при проектировании и в процессе эксплуатации гетерогенных сотовых сетей LTE.

Объект исследования. Объектом исследования является перспективная городская гетерогенная сотовая сеть LTE.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы системного анализа и оптимизации по критерию энергосбережения в гетерогенных сотовых сетях LTE.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Получил дальнейшее развитие метод сокращения энергопотребления подсистемой базовых станций гетерогенной сотовой сети LTE на основе оптимального управления режимами макро и микро базовых станций в сочетании с детерминированием критерия выбора сот абонентским оборудованием,

позволяющий минимизировать потребляемую подсистемой электроэнергию в течение суток.

2. Получил дальнейшее развитие метод планирования гетерогенной сотовой сети LTE, обеспечивающий оптимизацию структуры подсистемы базовых станций при выборе территориального расположения и расчете количества базовых станций, основанный на оценке абонентской плотности и параметров трафика по отдельным территориальным зонам с учетом минимизации энергопотребления.

3. Впервые обоснован критерий оптимизации, позволяющий за счет изменения коэффициента диммирования макро базовой станции и включения/выключения микро базовых станций в сочетании с актуализацией критерия выбора сот обеспечить минимизацию энергопотребления гетерогенной сотовой сетью LTE. Использование предложенного критерия оптимизации дает сокращение энергопотребления подсистемой базовых станций на 25,62% по отношению к существующим подходам.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов исследований заключается в раскрытии особенностей потребления энергии базовыми станциями гетерогенных сотовых сетей LTE, их использовании для повышения энергосбережения в таких сетях и обосновании методики оптимизации структуры гетерогенной сотовой сети LTE с учетом минимизации энергопотребления.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»: ГТ № Н-3-11 «Исследование и разработка методов проектирования и повышения технической эффективности цифровых систем управления, информационно-измерительных систем и телекоммуникаций»: ГТ № Н-9-16 «Разработка системы автоматического управления очередью пограничного маршрутизатора в инфокоммуникационных системах».

Практическая значимость работы.

1. Разработаны рекомендации по минимизации общего потребления энергии подсистемой базовых станций гетерогенной сети LTE, которые могут быть использованы операторами сотовых сетей LTE крупных городов.

2. Разработаны рекомендации по оптимизации структуры гетерогенной сети LTE с учетом минимизации энергопотребления, которые могут применяться при планировании таких сетей.

3. Разработан программный комплекс для моделирования работы гетерогенной сети LTE для различных критериев выбора сот и режимов сокращения энергопотребления базовыми станциями;

4. Разработан программный комплекс для моделирования алгоритма оптимизации энергопотребления гетерогенной сети LTE.

Полученные результаты могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными организациями, телекоммуникационными компаниями при планировании, развертывании и эксплуатации гетерогенных сотовых сетей LTE. Практическая реализация результатов работы подтверждается справкой о внедрении в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка № 30-12/234 от 20.11.2020 об использовании в учебном процессе при проведении лабораторных занятий по дисциплинам «Системы и сети радиосвязи» для студентов направления подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; «Математическое моделирование устройств и систем», «Теория построения инфокоммуникационных сетей и систем» для студентов направления подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»), справкой о внедрении в ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ОПЕРАТОР СВЯЗИ» (ГП «РОС»).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы, основанные на положениях общей теории связи, теории распространения сигналов, а также методы системного анализа, методы оптимизации и математического моделирования, в частности симплекс-метод.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено влияние различных критериев выбора сот абонентским оборудованием, процедур включения/выключения микро базовых станций и диммирования потребляемой мощности макро базовых станций на основные параметры работы гетерогенной сотовой сети LTE, обеспечивающие сокращение общего энергопотребления подсистемой базовых станций.

2. Показано, что на основе предварительной оценки параметров трафика и привязки его к территориальным зонам с учетом потенциальных мест расположения базовых станций и скопления пользователей возможна структурная оптимизация гетерогенной сотовой сети, а именно, территориального расположения и количества макро и микро базовых станций, обеспечивающая полное покрытие и заданное качество обслуживания отдельных зон и всей сотовой сети в целом.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью формулировки математического описания задачи; использованием основополагающих положений системного анализа и результатами математического моделирования при решении поставленных задач в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) в частности: п.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п.5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п.9. «Разработка проблемно-

ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых», г. Донецк, 26-28 мая 2020 года; Международная научно-техническая конференция «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование», г. Донецк, 27-28 мая 2020 года.

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также их внедрению в производство.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 7 научных работах, в том числе: 5 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН ДНР; 2 – по материалам конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 132 страницы машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 82 источников и 1 приложения. Основной текст, изложенный на 130 страницах, иллюстрируется 30 рисунками и содержит 9 таблиц.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ LTE

1.1 Общее описание гетерогенных сетей LTE четвертого поколения

История успеха технологий 2G заключается в том, что миллиарды людей получили доступ к голосовым и SMS-сообщениям даже в отдаленных уголках мира. Сейчас задача состоит в том, чтобы воспроизвести такой успех для высокоскоростной передачи данных с использованием технологий 4G и следующих поколений.

Некоторые из основных улучшений в сетях 2G и 3G были в основном связаны с повышением спектральной эффективности связи с использованием более сложных схем модуляции и множественного доступа [4].

В сетях 4G подход к планированию сети отличается от использовавшегося ранее подхода по размещению мощных базовых станций с большой зоной покрытия. Соответственно этому подходу операторы сотовой связи четвертого поколения должны увеличивать плотность размещения базовых станций (БС) и повышать спектральную эффективность при помощи MIMO (Multiple Input Multiple Output) и других технологий. Однако возможность развертывания новых базовых станций довольно скоро достигает предела из-за переиспользования частот и дороговизны, и их установка станет нецелесообразной в крупных городах.

Основными особенностями стандарта Long Term Evolution (LTE) являются использование технологии OFDMA для нисходящего канала связи и SC-FDMA для восходящего канала, спектральная гибкость, использование нескольких антенн и координация межсотовой интерференции. Технология OFDMA обеспечивает множественный доступ за счет разделения канала на несколько ортогональных поднесущих, разделенных на группы в зависимости от потребностей каждого абонента.

Недостатком технологии OFDMA является значительный диапазон мощности в выходном сигнале. Поскольку потребление энергии особенно важно для восходящего канала связи, в нем используется технология SC-FDMA как более эффективная альтернатива с точки зрения энергопотребления.

Спектральная гибкость относится к ключевым характеристикам стандарта LTE. Она позволяет совмещать как деятельность разных операторов, так и различных услуг одного оператора, а также учитывать географические особенности покрываемой территории.

Использование нескольких антенн дает дополнительную защиту радиоканала от затухания сигнала и позволяет получить более высокую скорость передачи данных за счет параллельного использования нескольких каналов.

Стандарт LTE позволяет осуществлять координацию базовых станций для определения текущего местоположения пользователя. А использование различных схем одновременного использования частот дает возможность снизить межсотовую интерференцию.

В системах 2G, где голос был доминирующим, для установления вызова достаточным было минимальное качество сигнала. Следовательно, планирование зоны покрытия и пропускной способности были в определенном смысле несложными, поскольку для определения зоны покрытия было достаточно обеспечения в ней минимального качества сигнала [7]. В системах 4G на пропускную способность радиосоединений влияет отношение сигнал/шум SNR. Это связано с тем, что такие функции, как модуляция более высокого порядка и функция пространственного мультиплексирования MIMO в LTE, требуют эффективного использования SNR. Влияние разницы отношения сигнал/шум SNR на качество связи с пользователем в сетях 2G и 4G отображено на рисунке 1.1.

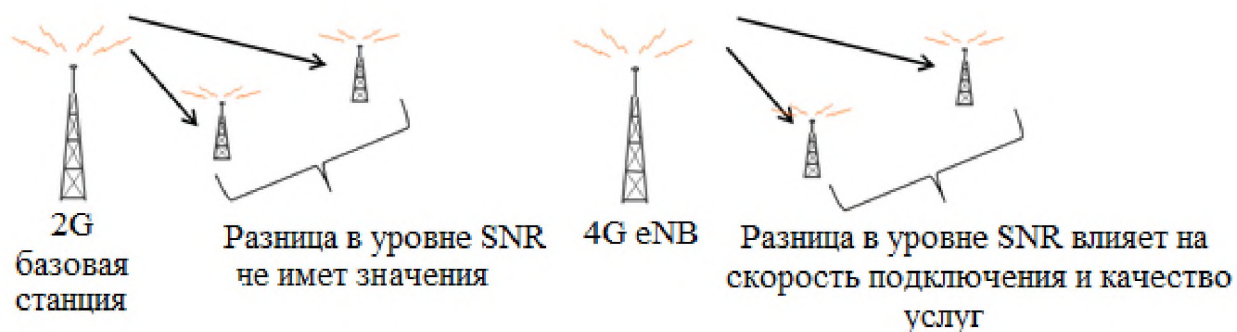


Рисунок 1.1 – Влияние разницы отношения сигнал/шум SNR на качество связи с пользователем в сетях 2G и 4G

Следовательно, в сети 4G для обеспечения требуемого уровня SNR, конечные точки радиосвязи должны быть близки друг к другу. Кроме того, люди, как правило, собираются в таких местах, как торговые центры, аэропорты и тому подобное, и используют свои 4G-устройства. Характер такого использования в сочетании с высокой плотностью населения в таких местах требует другой стратегии развертывания. Все эти условия для высокоскоростных беспроводных сетей требуют гетерогенной стратегии развертывания с использованием сот меньшего размера желательно с низким энергопотреблением, размещенных в стратегических точках, для увеличения покрытия и качества связи мобильных макросетей [17]. Такая стратегия предусматривает несколько типов сот совместно развертываются для обеспечения хорошего высокоскоростного беспроводного доступа.

Сравнение принципов развертывания в сетях 2G/3G и сетях 4G приведено на рисунке 1.2.

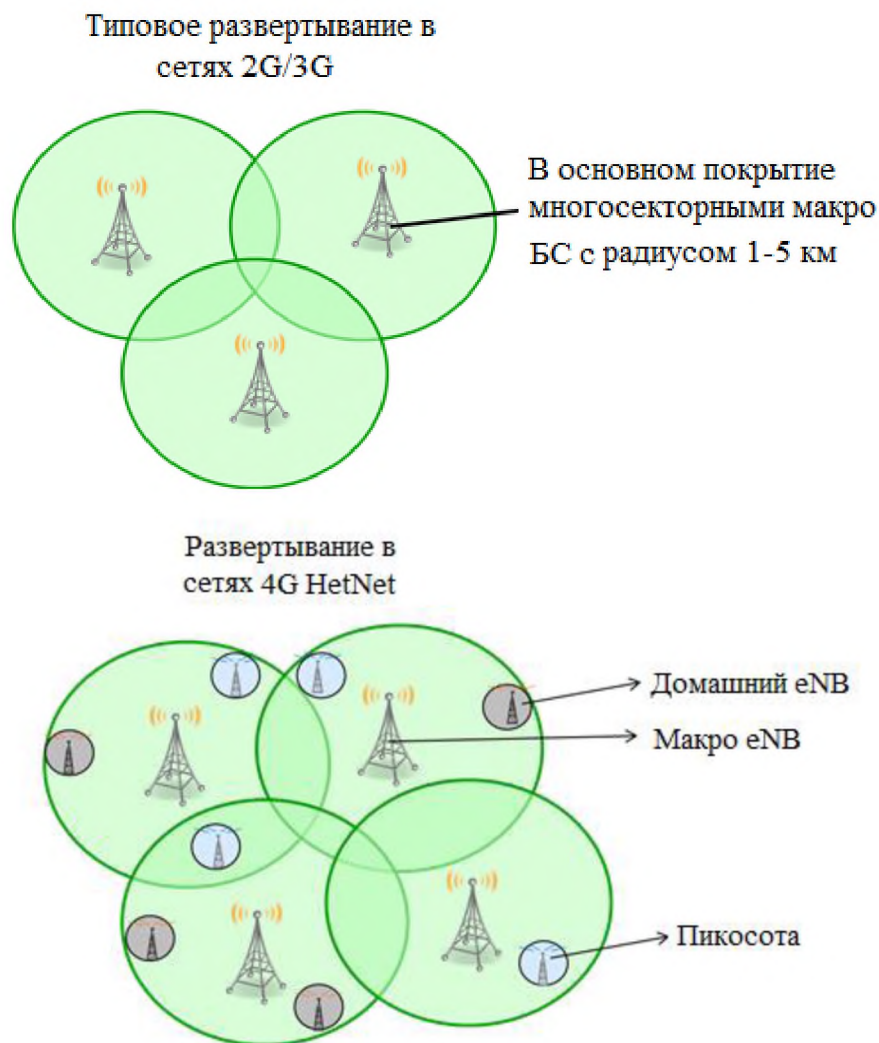


Рисунок 1.2 – Сравнение принципов развертывания в сетях 2G/3G и сетях 4G

Гетерогенная сетевая архитектура с множеством частотных диапазонов, использованием различных технологий радиодоступа и базовых станций с различной величиной зон покрытия, является тенденцией развития сетей сотовой связи LTE [32].

Рассмотрим два типа сценарием развертывания гетерогенных сотовых сетей.

1.1.1. Развертывание Indoor

Indoor-покрытие классифицируется по разделению (множественный или нет) и в зависимости от размера покрытия (малых, средних или больших).

Типичным местом для размещения базовых станций с малым и средним размером покрытия и множественным доступом являются жилой дом, супермаркет, метро и конференц-залы, а также другие места с низкими потолками, двигающимися пользователями и с высокими требованиями к емкости [55]. К данному типу относят пикосоты LTE и точки доступа Wi-Fi.

Большие многопользовательские Indoor точки доступа включают большие офисные здания, отели и другие места, где наблюдается высокая плотность пользователей с высоким спросом.

1.1.2. Развертывание Outdoor

Outdoor-покрытие делятся на три категории – мелкие, независимые Hotspot'ы ("HotDots"), уличные Hotspot'ы ("HotLines"), и большие зональные Hotspot'ы ("HotZones").

В "HotDot" (кафе) спрос высок, но охват довольно мал, и пользователи в основном находятся на месте. В "HotLine" плотность абонентов и потребности высоки, а охват сравним с городской улицей, причем "HotLine" активно взаимодействует со всеми услугами и бизнесами на этой улице, что должно учитываться при развертывании. "HotZone", как правило, относится к крупным площадям и другим общественным местам, в которых плотность пользователя и спрос высоки, но только при определенных обстоятельствах, которые чаще всего довольно хорошо предсказуемы [80].

Outdoor-покрытие может использовать микросоты LTE, причем небольшие соты Indoor-покрытия должны в основном дополнять outdoor-покрытие, используя с ним в связке.

Таким образом, можно выделить несколько видов «малых» сот в зависимости от сферы применения, мощности и радиуса покрытия: макросоты, микросоты, пикосоты и фемтосоты. Их сравнительная характеристика с традиционными макросотами приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика малых сот

Тип соты	Мощность, Вт	Радиус действия, км	Количество пользователей	Расположение
Макро	10 — >50	8 — 30	>2000	Вне помещений
Микро	1 — 10	0,2 — 2	100 — 2000	Вне/внутри помещений
Пико	0,25 — 1	0,1 — 0,2	30 — 100	Вне/внутри помещений
Фемто	0,001 — 0,25	0,010 — 0,1	1 — 30	Внутри помещений

Покрывание макросот зависит от частоты, полосы пропускания сигналов и ландшафтных особенностей местности. Антенны макросот должны быть грамотно установлены на высотах, с которых обеспечивается беспрепятственный обзор прилегающей территории. Производительность макросот может быть улучшена за счет увеличения эффективности трансивера. Этот тип сот обеспечивает покрытие большой площади. Поэтому их устанавливают, в частности, вблизи от автомагистралей и в сельской местности.

Микросоты обслуживаются базовыми станциями меньшей мощности и способны покрыть территорию ограниченной площади. Например, торгово-развлекательный центр, гостиницу или транспортный узел. Как правило, микросота превышает по размеру пикосоту, но это соотношение соблюдается не всегда.

Пикосоты обычно оснащены однонаправленными антеннами и могут быть расположены как внутри помещений, так и вне их.

Фемтосоты в основном используются в домашних сетях и используют однонаправленные антенны.

Использование малых сот обеспечивает гибкость и повышает качество предоставляемых пользователям услуг при невысоких затратах на их установку. Развертывание инфраструктуры малых сот также дает лучшее качество сигнала при меньшей мощности. Малые соты обслуживают компактные базовые станции, различных типов, соответствующих видам сот. Как правило, такие базовые

станции характеризуются небольшим размером, а их аппаратное обеспечение интегрировано в один физический блок. Вес компактных базовых станций не превышает нескольких килограмм. Поэтому их легко устанавливать и эксплуатировать.

Несмотря на различия в архитектуре и форм-факторе макро и микро базовые станции поддерживают одинаковую скорость передачи данных при экспериментах в лабораторных условиях при отсутствии интерференции.

Малые соты предоставляют большую емкость, чем макросоты из-за особенностей развертывания. Поскольку компактные базовые станции устанавливаются на меньшей высоте, они менее подвержены интерференции, что приводит к увеличению емкости.

Более высокое качество сигнала приводит к увеличению пропускной способности, поскольку позволяет системе работать более эффективную схему передачи данных с точки зрения спектрального ресурса. Таким образом, относительный размер зоны, в пределах которой абонент может передавать и принимать данные на более высокой скорости, для малых сот больше, чем для макросот.

Кроме того, существует ряд дополнительных преимуществ использования малых сот. Меньшие задержки позволяют пользователям работать на более высокой скорости передачи данных. Малые соты обеспечивают лучшее покрытие внутри помещений. Учитывая, что около 40% мобильного трафика исходит из дома, а ещё около 25% с места работы, это приносит большую выгоду операторам. В макросотах качество услуг ухудшается на границах соты, которые составляют значительную часть общей площади. Малые соты предоставляют лучшую производительность вблизи от границ соты.

В настоящее время в сетях LTE используются более 70 частотных полос, лежащих в диапазоне от 450 до 5 900 МГц [35]. Более низкая частота, как правило, увеличивает площадь покрытия и качество прохождения сигнала в условиях городской застройки, но уменьшает ёмкость сети и скорость передачи данных.

Операторы сетей LTE в крупных городах используют преимущественно три частотных полосы: 3, 7 и 20. При этом существует тенденция предпочтительного использования полосы 3 для макро базовых станций и полосы 7 для микро базовых станций. Их сравнительная характеристика приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительная характеристика частотных полос LTE

Полоса	Центральная частота, МГц	Дуплексный режим	Возможная ширина каналов, МГц
3	1800	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
7	2600	FDD	1.4, 3, 5, 10
20	800	FDD	5, 10, 15, 20

На рисунке 1.3 в обобщенном виде приведен пример гетерогенной сотовой сети, включающей макросоты, микросоты и Wi-Fi точки.



Рисунок 1.3 – Обобщенный пример гетерогенной сотовой сети

Для разгрузки макро базовых станций требуется большое количество микро базовых станций, устанавливаемых в местах наибольшего скопления людей. При этом для их развертывания требования должны быть невысокими благодаря подведению уже имеющейся в сети трансмиссии и встроенным источникам питания.

1.2 Анализ исследований по сокращению потребления энергии в сотовых сетях

Благодаря быстрому росту популярности смартфонов и планшетов наблюдается постоянный рост спроса на услуги в сотовых сетях. Добавление улучшенных и усовершенствованных средств сотовой связи будет по-прежнему определять повышенный спрос на услуги и обеспечение повсеместного беспроводного доступа [1]. Прогнозируется, что не менее 20% трафика будет беспроводным к 2020 году [2]. При этом увеличение потребления энергии для обеспечения беспроводных соединений в сетях, по оценкам, составляют до 80% от общего потребления энергии. То есть, базовые станции сетей доступа потребляют наибольшую долю энергии в сотовых сетях. Кроме того, [5] отмечает, что финансовые затраты на энергию в настоящее время превышают затраты персонала на эксплуатацию сетей. В результате в последнее время много внимания уделяется вопросам сокращения потребления энергии в сетях доступа LTE. Основное внимание уделяется снижению энергопотребления сетевого оборудования, а не мобильных устройств клиентов. Потребление энергии в пользовательском оборудовании незначительно уменьшилось за последние два десятилетия. Для оборудования сегодняшнего пользователя требуется более, чем на 97% меньше мощности, чем в 1990-х годах. Это сделало незначительным потребление энергии в пользовательском оборудовании по сравнению с потреблением в базовых станциях [73]. Таким образом, потребление энергии сетью на порядок больше, чем общая энергия, потребляемая мобильными устройствами пользователей [6].

Однако, несмотря на то, что технология LTE давно используется, до сих пор при их эксплуатации операторы связи уделяют мало внимания вопросам экономии потребляемой энергии.

Для уменьшения потребления энергии самым простым способом является выключение сетевого оборудования.

Большая часть энергии, потребляемой в гетерогенной сотовой сети доступа, расходуется в макро базовых станциях. Исследования показывают, что количество энергии, которое можно сэкономить, в значительной степени зависит от того, как система обрабатывает трафик [26]. В частности, если принудительно переводить трафик и подключать пользователей на определенные базовые станции, другие базовые станции можно временно отключать, тем самым снижая потребляемую всей сетью мощность.

Исследования [8,9,10] предложили и рассмотрели несколько методов для выключения невостребованных в определенные периоды времени узлов базовых станций. Методы используют тот факт, что спрос на трафик изменяется со временем, а сеть спроектирована и развернута с учетом максимального спроса. Таким образом, существует возможность выключения базовых станций, когда трафик ниже пиковых значений. Кроме того, чтобы повысить вероятность выключения конкретной базовой станции, можно управлять подключением пользователей к данной базовой станции и передавать его другим базовым станциям. Предполагается, что оставшиеся включенными активные базовые станции несут ответственность за предоставление услуг пользователям в течение некоторого периода. Кроме того, эти исследования показали, что эксплуатация небольших зон покрытия может повысить энергоэффективность и снизить общее энергопотребление сети. При развертывании базовых станций меньшего покрытия увеличивается доступная полоса пропускания для каждого пользователя, а энергия, потребляемая посредством передачи сигнала, снижается, обеспечивая при этом лучшую мощность принятого сигнала для пользователей.

Однако при таком подходе возникают некоторые трудности. В большинстве случаев выключение базовой станции оставляет зоны соседних базовых станций с плохим обслуживанием или вообще без обслуживания. Это может привести к недовольству клиентов в этой области или конфликту с нормативными требованиями. В некоторых случаях для компенсации выключения базовой станции расширение зоны покрытия соседних базовых станций потребовало бы еще большего потребления энергии [59]. Хотя внедрение базовых станций с

меньшим покрытием может облегчить проблему низкого качества обслуживания (QoS) после выключения базовой станции, плотное развертывание базовой станции требует дополнительного управления помехами. И последнее, установка дополнительных базовых станций требует расширения транспортной сети для поддержки базовых станций, что влечет дополнительные затраты.

За последние пять лет проблема потребления энергии в сотовых сетях привлекает особое внимание исследователей, особенно с точки зрения управления энергоэффективностью таких сетей. В большинстве работ отмечается, что базовые станции потребляют большую часть электроэнергии, чтобы обеспечить круглосуточное покрытие с заданным качеством. Некоторые учёные предлагают для экономии электроэнергии отключать базовые станции, использовать соты меньшего размера и частично отключать отдельные услуги. Ряд исследователей выдвигают идею воспользоваться наличием большого количества базовых станций в местах с высокой плотностью абонентов и отключать одну из них в периоды низкой нагрузки. В других работах предлагается разделить зону обслуживания на меньшие участки и направлять запросу пользователей меньшему количеству базовых станций. При этом задаётся пороговое значение нагрузки, при достижении которого наименее востребованная базовая станция будет отключена. Такой же подход можно применять и к сети в целом. Все эти методы объединяет допущение, что соседние базовые станции могут расширять зоны своего покрытия и таким образом выполнять запросы пользователей, находящихся в зоне обслуживания отключенных базовых станций. Для того, чтобы осуществить это необходимо предварительно проанализировать физическое место положения антенны.

Однако увеличение размеров сот имеет ряд потенциальных недостатков. Например, при этом увеличивается интерференция с соседними сотами и снижается доступная полоса пропускания для пользователей, а также увеличивается потребление электроэнергии системой. Авторы исследования указывают на то, что частой включение и выключение сетевого оборудования приводит к большему расходу электроэнергии в единицу времени, чем

постоянное поддержание оборудования во включенном. Количество электроэнергии, необходимое для покрытия дополнительной территории нередко превышает то количество электроэнергии, которое можно сэкономить, выключая базовые станции. В работе [31] предлагается в периоды низкой нагрузки собирать трафик в меньшее количество частотных полос, и отключать неиспользуемые.

Чтобы решить проблемы, возникающие в сетях, использующих только макро базовые станции предлагается задействовать соты меньшего размера. В зависимости от требуемой площадки покрытия и мощности передачи выделяют четыре стратегии развертывания малых сот. При этом места расположения микро базовых станций определяются на основании расстояния между ними и макро базовой станцией. Ряд исследований основан на координации стратегий базовых станций.

Отдельное внимание уделяется вопросам энергоэффективности в многоуровневых сетях. Изначально использовать гетерогенные сотовые сети предлагалось для улучшения спектральной эффективности путем перенаправления трафика с макро базовых станций на микро базовые станции. Такой подход приводит к росту потребления электроэнергии, поскольку предполагает установку дополнительных базовых станций. Тем не менее, за счет того, что микро базовые станции будут находиться в режиме ожидания, гетерогенные сети могут экономить больше электроэнергии, чем одноуровневые сотовые сети. В часы наибольшей нагрузки потребляющие меньше электроэнергии микро базовые станции могут включаться и частично разгружать макро базовые станции. После этого микро базовые станции переходят в режим ожидания в периоды низкой нагрузки на сеть, когда макро базовые станции могут поддерживать полное покрытие и заданное качество услуг.

Работы [24] изучали возможности использования микро базовых станций в режиме динамического ожидания. В этом случае покрытие сети увеличилось, но потребление электроэнергии возросло в тех случаях, когда микро базовые станции не адаптировались к уровню трафика. В подобных методах главной проблемой является необходимость подключать пользователей к определенным

базовым станциям, чтобы минимизировать потребление электроэнергии после того, как микро базовые станции с небольшой нагрузкой перейдут в режим ожидания. Другие исследователи [36] используют теорию нечетких множеств, чтобы выявить переиспользование частот и улучшить спектральную эффективность. Учёные [15] применяют стохастическую геометрию, чтобы моделировать многоуровневую гетерогенную систему и оптимизировать потребление мощности путем отключения базовых станций при добавлении дополнительных менее мощных базовых станций. В таком случае энергоэффективность повышается за счёт различных комбинаций включения и выключения базовых станций. Исследования [37] выдвигают идею отключения малых сот, когда уровень запросов пользователей опускается ниже определенного порога. Это приводит к тому, что снижается потребление электроэнергии сетью в целом. В работе [38] предлагается использовать одну полосу частот для нескольких базовых станций. При этом происходит снижение интерференция между сотами и таким образом уменьшается потребление электроэнергии. Чтобы обеспечить полное покрытие зоны обслуживания исследователи [39] находят оптимальное количество базовых станций, которые могут быть отключены как функцию радиуса соты. Все эти способы объединяет то, что энергосбережение в них базируется только на отключении микро базовых станций.

В настоящее время не существует единого стандартного показателя энергоэффективности, по которому можно было бы сравнить производительность различных механизмов снижения потребления электроэнергии [41]. Главной проблемой в этом вопросе является то, что различия между разными сотовыми сетями настолько велики, что сопоставление их энергозатрат становится субъективным. Сравнение зависит во многом от набора контрольных показателей и спецификаций исследуемых сетей. Например, от моделей сетевого оборудования, типов базовых станций, количества уровней сети, характеристик рассматриваемой зоны обслуживания. Во многих статьях энергоэффективность измеряют в достижимой скорости передачи деленной на единицу энергии. Производительность сотовой сети может быть улучшена путем размещения

большого количества базовых станций, что увеличит емкость соты. Однако большее количество работающих базовых станций может привести к возрастанию интерференции, как показали результаты моделирования с использованием всех типов базовых станций при условии, что макро базовые станции и микро базовые станции работают в одной полосе частот. Интерференцию может вызвать сигнал от макро базовой станции, либо от микро базовых станций, либо их сочетание [82]. Работы [11, 43] рассматривают интерференцию в зоне с высокой плотностью микро базовых станций в то время, как [44] представляет влияние интерференции различных типов базовых станций, когда они передают сигналы на одном уровне энергии. Исследование [27] предлагает использовать блоки базовой полосы частот, которые могут адаптивно менять базовую частоту. Изменяя их сеть может в определенное время перераспределять базовые частоты в зоны, где требуется больший спектр сигнала, чтобы повысить энергоэффективность, снизить интерференцию и улучшить спектральную эффективность.

Для измерения эффекта интерференции широко используются такие показатели, как вероятность покрытия, вероятность отключения и достижимая скорость передачи. В работе [63] показано, что при выключении базовых станций интерференция снижается, а вероятность покрытия и достижимая скорость передачи увеличиваются. Вероятность отключения указывает на то, что сеть не может обеспечить заданное качество услуг пользователям, у которых значение соотношения сигнал/шум находится ниже заданного порога или нет доступных полос частот [79]. Авторы статьи [45] рассматривают вероятность отключения как результат отключения базовых станций для оптимизации потребления электроэнергии. Но при этом не учитывается качество обслуживания отдельных абонентов. В некоторых работах пренебрегают влиянием интерференции, когда микро базовые станции расположены далеко друг от друга [30], находятся в одной макросоте [46] или их зоны покрытия не пересекаются. Проводились исследования оптимизации количества микро базовых станций, чтобы сбалансировать показатели максимальной энергоэффективности, производительности сети, вероятности отключения, количества пользователей в

соте [47]. Одним из способов избежать высокой интерференции является сочетание диапазонов покрытия с количеством активных базовых станций на одну соту [48]. Другая методика уменьшения интерференции основана на стратегии переиспользования частот, которая представлена в работах [12, 13, 33, 49]. Все подобные исследования исходят из того, что одна полоса частот совместно используются макро базовыми станциями и микро базовыми станциями, вызывая высокую вероятность интерференции.

Чтобы снизить эффект интерференции, разработаны несколько способов координации межсотовой интерференции. Однако, чтобы оградить пользователей микро базовых станций от интерференции, вызванной макро базовыми станциями, пользователи макро базовых станций должны получить более низкое качество предоставляемых услуг. Поэтому в данной работе в гетерогенной сотовой сети предлагается использовать две частотные полосы, чтобы минимизировать существующую интерференцию между макро базовыми станциями и микро базовыми станциями. Две различные полосы частот могут использоваться одновременно в одной зоне обслуживания для разных уровней гетерогенной сети. При этом макро базовые станции, которые обслуживают большую территорию покрытия, работают на полосе с более низкой частотой. Микро базовые станции, обеспечивающие меньшую площадь покрытия, работают на полосе с более высокой частотой. Технология LTE позволяет микро базовым станциям решать только задачи передачи данных пользователям, а задача поддержания заданного уровня сигнала возлагается на макро базовые станции [56, 57]. Но такой подход резервирует полосу с более низкой частотой для пользователей во время периодов низкой нагрузки, чтобы расширить зону покрытия после отключения базовых станций в то время, как обе полосы частот используются одной базовой станцией [58].

Большинство ученых, занимающихся данной проблемой ставят перед собой цель удовлетворить запросы пользователей в полном объеме и в равной степени для всех их них. Однако запросы пользователей могут быть разделены на несколько уровней и предоставляемые услуги могут быть соответственно

распределены без уведомления пользователей вместо того, чтобы всегда обеспечивать максимальный уровень качества услуги [28]. В работе [14] показано, что возможно предоставлять различные уровни качества услуг, даже если базовая станция работает на постоянном уровне мощности. Уровни качества услуг зависят от количества пользователей, делящих между собой постоянную ограниченную полосу частот. Более того, хотя несколько исследований уделяют внимание важности разных методик планирования сети для различных зон обслуживания, в них не предлагается конкретных методов, учитывающих эту разницу. С учетом этого [82] предполагает, что сеть можно разделить на пять типичных зон развертывания: городскую с высокой плотностью пользователей, городскую, пригородную, сельскую и ненаселенную. Кроме того, сутки могут быть разделены на пять периодов: ночь, утро, период средней нагрузки, период высокой нагрузки и период наибольшей нагрузки. Однако в этой статье не описывается, как применять разработанную классификацию при моделировании. В исследовании [62] указывают на то, что профиль трафика в зонах, обслуживаемых пикосотами может отличаться от профиля в больших по площади зонах, обслуживаемых макро базовыми станциями. В работе [51] выдвигается идея деления сотовой сети на четыре типа зон обслуживания: деловую, торгово-развлекательную, придорожную и жилую. Дополнительно предполагается, что оптимизация потребления электроэнергии будет более эффективной, если рассматривать отдельно различные временные интервалы и пики нагрузки в определенных зонах, а не средние параметры сети. Емкость сети следует динамически изменять в зависимости от количества запросов пользователей, которые принимают разные значения в различное время и различных местах. Другое исследование доказывает, что энергосбережение от выключения базовых станций увеличивается, когда диапазон уровня трафика и плотности абонентов базовых станций широки. Это означает, что снизить потребление электроэнергии более вероятно в районах, где показатели трафика и количество абонентов в зоне покрытия базовой станции значительно меняются на протяжении суток. Такая картина характерна для крупных городов.

Вместо того, чтобы рассматривать трафик сети в целом или в различных зонах, что может привести к неточному усреднению, в некоторых работах принимают во внимание расположение пользователей, чтобы создать географическую модель распределения трафика. Положение пользователей также является важным фактором для вычисления достижимой скорости передачи данных для них и оценки производительности сети. Выделяют два основных подхода к распределению пользователей. Можно считать, что пользователи равномерно распределены по территории сети [22, 23, 34, 40, 78], а средние показатели трафика соответствуют количеству запросов пользователей. Несмотря на то, что равномерное распределение пользователей может представлять территориальные характеристики запросов пользователей на значительной площади, оно не отражает случаи, когда абоненты скапливаются в определенных местах, создавая повышенную нагрузку на сеть в определенное время. Так пользователи могут собираться в местах массового скопления, формируя зоны высокой плотности абонентов и повышенного уровня запросов на небольшой территории. В таких случаях распределение пользователей более точно описывает процесс Пуассона со специфическими местами концентрации пользователей и точками высокого уровня запросов. Но при этом используя только процесс Пуассона невозможно отразить значительный уровень трафика вдали от таких точек. Исследования [65, 66] показывают, что применение микро базовых станций может привести к существенной экономии электроэнергии, когда они расположены в местах скопления пользователей, а количество сэкономленной электроэнергии возрастает, если трафик перераспределяется по пикосотам. Хотя в данном случае идёт речь о транспортной сети связи, по сути рассматривается первое соединение в ней. Потребление электроэнергии в транспортной сети считается независимым от уровня трафика и расположения базовых станций. В работе [67] предлагается перераспределять абонентов по сотам, чтобы дать возможность отключать базовые станции за счет перенаправления пользователей от базовой станции с низкой загрузкой к другой станции в диапазоне действия абонентского устройства. Однако в этой статье не рассматривается влияние

такого перенаправления на производительность сети. Похожая идея выдвигается учеными [68], где описана модель оптимизации, цель которой состоит в выключении базовых станций, к которым не подключены пользователи и поддержании заданного качества обслуживания. Данная модель гарантирует полное покрытие территории сети.

Вопросы потребления электроэнергии редко рассматриваются при планировании сетей. Лишь в нескольких работах изучается потенциальная минимизация расходов на потребляемую электроэнергию путем учета будущих затрат энергии. Возможности сократить расходы электроэнергии зависят в значительной мере от структуры сети и расположения базовых станций. Критическими показателями, которые ограничивают пределы энергосбережения являются гарантия полного покрытия, расположение базовых станций в соответствии с расположением пользователей, адаптация механизма в соответствии с профилем трафика. В исследовании [69] представлен возможный подход к развертыванию сети, особенностью которого является то, что однородная сеть, состоящая только из макро базовых станций заменяется на микро базовые станции, чтобы снизить мощность передачи данных и сократить потребление электроэнергии всей сетью. Однако для полного покрытия такой сети требуется значительное количество базовых станций и высокие расходы на установку большого числа микро базовых станций и организацию транспортной сети для них. Ещё одна работа рассматривает ограничения по показателю QoS, покрытию и емкости сети для оптимального выбора мест расположения базовых станций [70]. Результаты показывают, что для достижения наибольшей энергоэффективности сотовая сеть должна включать существенное количество микро базовых станций. Также необходимо найти баланс между стоимостью развертывания сети и уровнем энергосбережения. Необходимость полного покрытия территории сети ограничивает возможности энергосбережения в тех случаях, когда уровень трафика низкий, если не используются специфические методы сокращения потребления электроэнергии в оставшихся базовых станциях. В работе [71] начальные финансовые затраты на развертывание сети считаются

дополнительным фактором оптимизации расхода энергии. Однако при этом учитываются только стоимость установки оборудования сети. А затраты на подключение базовых станций к транспортной сети, которые зависят от расстояния между базовыми станциями, необходимо изучать дополнительно. Также в данном исследовании не принято во внимание планирование частотных полос.

Большинство опубликованных материалов рассматривают в основном задачи повышения энергоэффективности сотовых сетей или сокращения потребления электроэнергии за счет отключения части оборудования. Такой подход не учитывает причины повышения энергопотребления. Одним из факторов, вызывающих рост потребления электроэнергии является повышение запросов услуг. Обслуживание запросов пользователей при стандартном подходе к загрузке сети ограничивает возможность снизить энергопотребление сетью.

1.3 Формализация задачи энергопотребления в гетерогенной сети LTE

Для гетерогенной сети LTE, состоящей из сот различного размера общее потребление энергии является суммой потребления энергии всеми её составляющими, а также дополнительных расходов на обслуживание вспомогательного оборудования, вентиляции и охлаждения [18].

Потребление электроэнергии одной макро базовой станцией в каждый интервал времени составит:

$$E_{macros} = \alpha \cdot (E_{mac} + W_{adda}) \quad (1.1)$$

где E_{macros} – общее потребление энергии системой макро базовой станции;

E_{mac} – потребление энергии макро базовой станцией;

W_{adda} – дополнительное потребление энергии вспомогательным оборудованием;

a – переменная, которая принимает значение 1, если станция включена, и значение 0, если станция выключена.

Для экономии потребления электроэнергии современные макро базовые станции имеют возможность пошагового диммирования, то есть снижения мощности радиоизлучения в зависимости от количества подключаемых пользователей. Таким образом формула (1.1) примет вид:

$$E_{macros} = a \cdot (E_{mac} + W_{adda}) \cdot K \quad (1.2)$$

где K – коэффициент диммирования.

Тогда общее потребление энергии N_{macro} макро базовыми станциями в каждый интервал времени составит:

$$\sum_{i=1}^{N_{macro}} a \cdot (E_{mac.i} + W_{adda}) \cdot K + N_{macro} \cdot W_{per} \quad (1.3)$$

где W_{per} – потребление энергии постоянно работающими системами вентиляции и кондиционирования.

Потребление электроэнергии одной микро базовой станцией в каждый интервал времени составит:

$$E_{micros} = b \cdot (E_{mic} + W_{addb}) \quad (1.4)$$

где E_{micros} – общее потребление энергии системой микро базовой станцией;

E_{mic} – потребление энергии микро базовой станцией;

W_{addb} – дополнительное потребление энергии вспомогательным оборудованием;

b – переменная, которая принимает значение 1, если станция включена, и значение 0, если станция выключена.

Тогда общее потребление энергии N_{micro} микро базовыми станциями составит:

$$\sum_{i=1}^{N_{micro}} b \cdot (E_{mic.i} + W_{addb}) \quad (1.5)$$

Общее потребление энергии пико и фемто базовыми станциями находим аналогично микро базовым станциям. При этом у фемто базовых станций отсутствует вспомогательное оборудование.

Таким образом, общее потребление электроэнергии гетерогенной сетью LTE в каждый интервал времени составит:

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^{N_{macro}} a \cdot (E_{mac.i} + W_{adda}) \cdot K + N_{macro} \cdot W_{per} + \sum_{i=1}^{N_{micro}} b \cdot (E_{mic.i} + W_{addb}) + \sum_{i=1}^{N_{pic}} c \cdot (E_{pic.i} + W_{addc}) + \sum_{i=1}^{N_{fem}} d \cdot E_{fem.i} \quad (1.6)$$

где E_{pic} – потребление энергии пико базовой станцией;

W_{addc} – дополнительное потребление энергии вспомогательным оборудованием;

c – переменная, которая принимает значение 1, если станция включена, и значение 0, если станция выключена;

N_{pic} – количество пико базовых станций;

E_{fem} – потребление энергии фемто базовой станцией;

d – переменная, которая принимает значение 1, если станция включена, и значение 0, если станция выключена;

N_{fem} – количество фемто базовых станций.

Поскольку макро базовые станции должны работать постоянно, то $a = 1$ всегда. Таким образом, влиять на суммарное потребление электроэнергии, можно, изменяя значение переменных b , c и d с 0 на 1 при включении и с 1 на 0 при выключении микро, пико и фемто базовых станций соответственно, а также, изменяя коэффициент диммирования макро базовых станций K .

Минимальное значение потребления электроэнергии будет достигнуто при условии, что, $b = 0$, $c = 0$, $d = 0$, а также коэффициент диммирования K примет минимальное значение. Но в этом случае будет невозможно обеспечивать заданное качество обслуживания абонентов QoS, в частности, соблюдать определенную скорость передачи данных в зависимости от выбранной услуги. Требования к скорости передачи данных для различных услуг представлены в таблице 1.3

Таблица 1.3 – Требования к скорости передачи данных для различных услуг

Вид услуги	Скорость передачи данных, Мбит/с	Вероятность запроса услуги при нагрузке 0,2 Эрл
HTTP	2	0,5
SD-видео	3	0,25
HD-видео	5	0,15
FullHD-видео	8	0,05

Таким образом, для обеспечения заданного качества обслуживания абонентов необходимо в каждый интервал времени соблюдать следующие ограничения:

$$N_{abmac} \cdot a \geq N_{abmac}$$

где N_{abmac} – количество активных пользователей макро базовой станции.

$$N_{abmic} \cdot b \geq N_{abmic}$$

где N_{abmic} – количество активных пользователей микро базовой станции.

$$N_{abpic} \cdot c \geq N_{abpic}$$

где N_{abpic} – количество активных пользователей пико базовой станции.

$$N_{abfem} \cdot d \geq N_{abfem}$$

где N_{abfem} – количество активных пользователей фемто базовой станции.

$$BaseC \geq ExpC$$

где $BaseC$ – требуемая скорость передачи данных;

$ExpC$ – достижимая скорость передачи данных.

Для снижения общего потребления энергии в сети в соответствии с (1.6), могут быть два пути. Во-первых, это ограничение количества активных микро базовых станций, имеющее столько b равными нулю, насколько это возможно. Чтобы ограничить количество активных микро базовых станций, можно применить метод переключения микро базовых станций. Выключив микро базовые станции, мы получим для b в уравнении (1.6) значение, равное 0. Во-вторых, это уменьшение значений E_{micros} и E_{macros} в уравнении (1.6) на основе спроса на трафик. Эти переменные - это потребляемая мощность, необходимая для работы передатчиков, соответствующих базовым станциям. Потребность в трафике определяется числом пользователей в сети и уровнями их обслуживания. В соответствии с потребностями в трафике можно снизить потребляемую мощность за счет снижения уровня мощности передачи макро базовых станций в зависимости от количества пользователей, или сужения частотного спектра на основе уровней обслуживания пользователей, или того и другого.

Достигаемая скорость передачи для каждого пользователя определяется по формуле:

$$ExpC = 0,75 \cdot ExpB \cdot \log\left(1 + \frac{SNR}{1,25}\right) \quad (1.7)$$

где $ExpB$ – полоса пропускания, выделяемая каждому пользователю, зависит от N_{abmac} ;

SNR – отношение сигнал/шум.

Отношение сигнал/шум влияет на пропускную способность радиосоединений в системах 4G. Это связано с тем, что такие функции, как модуляция более высокого порядка и функция пространственного мультиплексирования MIMO в LTE, требуют эффективного использования SNR.

Когда в системе меньше пользователей, увеличивается доступная пропускная способность $ExpB$ для каждого пользователя. В результате SNR может быть ниже без снижения C . Снижение требований к уровню SNR дает возможность уменьшить мощность передачи. С другой стороны, когда пользователь получает высокий SNR, базовая станция может ограничить пользователя меньшим частотным ресурсом $ExpB$ при сохранении скорости передачи пользовательских данных $ExpC$.

Таким образом, потребление энергии сотовой сетью можно привязать к текущему спросу на трафик пользователями. При этом использование различных методов выбора сот пользовательским оборудованием или управление нагрузкой имеют решающее значение для экономии энергии. Примем, что макро базовые станции обычно потребляют значительно более высокую энергию, чем микро базовые станции, из-за более высокой мощности передачи. Передатчики макро базовых станций должны работать с высокой мощностью, потому что они охватывают гораздо более широкую зону и должны предоставлять услуги большему числу пользователей, чем микро базовые станции. Из-за стремительно растущей мобильной связи неизбежно дополнительное развертывание микро базовых станций. Предполагая, что микро базовые станции получают такую же пропускную способность, что и макро базовые станции, они также могут предоставлять услуги для многих пользователей, как и макро базовые станции.

При увеличении количества пользователей, подключенных к микро базовым станциям, можно уменьшить мощность передачи макро базовой станции. То есть, использовать схему диммирования или пошагового изменения потребляемой макро базовая станция мощности.

1.4 Постановка задачи диссертационного исследования

Анализ развития гетерогенных сетей LTE четвертого поколения и проблемы энергопотребления в них позволяет определить основную цель исследований - повышение эффективности функционирования перспективной городской гетерогенной сотовой сети LTE на основе оптимизации потребления энергии базовыми станциями путем анализа их загрузки, детерминирования их выключения и диммирования в сочетании с актуализацией критерия выбора сот абонентским оборудованием. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи исследования:

1. Определить факторы, влияющие на системные показатели эффективности функционирования гетерогенных сотовых сетей LTE.
2. Разработать математические модели информационных и технологических процессов в гетерогенных сотовых сетях LTE, влияющих на показатели энергопотребления базовых станций и уровни качество обслуживания абонентов.
3. Разработать критерий оптимизации функционирования гетерогенной сотовой сети LTE с точки зрения минимизации энергопотребления с учетом обеспечения заданного качества обслуживания.
4. Разработать методику планирования гетерогенной сотовой сети LTE на основе критерия структурной оптимизации с учетом плотности абонентов и типов зон обслуживания при обеспечении заданного уровня качества обслуживания.
5. Провести вычислительный эксперимент по практическому использованию разработанных методик и проанализировать полученные результаты.

6. Разработать рекомендации по использованию предложенных методик при проектировании и в процессе эксплуатации гетерогенных сотовых сетей LTE.

Выводы по разделу 1

1. Проанализированы тенденции развития сотовых сетей связи четвертого поколения стандарта LTE.

2. Показано, что в связи с увеличением трафика и плотности абонентов в крупных городах основным принципом развертывания является построение гетерогенной сети.

3. Проанализированы основные факторы, влияющие на энергопотребление в гетерогенной сети LTE.

4. Формализована задача управления энергопотреблением в сотовой сети LTE.

5. На основании выявленных нерешенных задач на теоретическом и практическом уровне энергосбережения в гетерогенных сотовых сетях LTE четвертого поколения стали сформулирована цель и задачи диссертационного исследования.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА СОТ ДЛЯ УСЛОВИЙ
ПЕРСПЕКТИВНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ LTE КРУПНОГО ГОРОДА

2.1 Описание объекта исследования

В качестве объекта исследования рассматривается часть крупного города, как типовая зона обслуживания, в которой установлена одна макро базовая станция и гипотетически предполагается развертывание шести микро базовых станций гетерогенной сети LTE.

Таким образом, рассматривается гетерогенная сотовая сеть LTE, в которой применяются базовые станции двух типов: для макросот – макро базовые станции и для микросот – микро базовые станции.

Рассмотрим основные тенденции развития гетерогенной сотовой сети для условий типового крупного города.

Технология LTE может работать на частотах от 450 МГц до 5 ГГц, технология LTE Advanced позволяет объединять в один канал несколько диапазонов [16].

Всего существует 70 так называемых полос частот LTE. На территории крупных городов могут теоретически использоваться 5 полос частот:

- 3 (диапазон 1800 МГц FDD);
- 7 (диапазон 2600 МГц FDD);
- 20 (диапазон 800 МГц FDD);
- 31 (диапазон 450 МГц FDD);
- 38 (диапазон 2600 МГц TDD).

Как правило, чем ниже частота, тем выше расстояние и лучше прохождение сигнала через городскую застройку, но меньше емкость сети и скорость передачи данных.

Полоса частот 31 используется в малонаселенных районах с плохим покрытием других сотовых сетей. Радиус действия стандарта LTE с диапазоном

450 МГц достигает 20 км, что в 5-6 раз больше, чем у стандарта LTE с диапазоном 2600 МГц.

Чем выше активность и плотность населения, тем выше требования по частоте для обеспечения высокой емкости и скорости передачи данных. В деловых центрах крупных городов, в местах с высокой активностью используются полосы частот 3, 7 и 38. В регионах с более низкой активностью и плотностью населения используется полоса частот 20, так как с ее помощью можно покрыть большой радиус (до 13,4 км) с хорошим проникновением в дома, при этом скорость передачи данных достаточна, так как меньше пользователей технологии LTE [54].

В настоящее время на территории многих крупных городов Европы основной является полоса частот 20 диапазона 800 МГц FDD. Однако, концепция развития гетерогенных сотовых сетей стандарта LTE для условий центра крупного города предусматривает использование диапазона частот 1800 МГц частотной полосы 3 для макро базовых станций и диапазона частот 2600 МГц FDD частотной полосы 7 для микро базовых станций [77].

Исследование сети проводится для центральной части типового крупного города. Плотность населения здесь составляет около 9400 человек на 1 км².

Количество потенциальных абонентов спрогнозируем как 20% от общего числа жителей, то есть 1880 пользователей на 1 км².

Среднее значение трафика на одного абонента в час наибольшей нагрузки (ЧНН):

$$R_t = \frac{T_a \cdot 2,2}{N_{Hours} \cdot N_{Days}} \quad (2.1)$$

где T_a – средний трафик одного абонента в месяц, примем $T_a = 30$ Гбайт/мес;

q – коэффициент для городской местности, $q = 2,2$;

N_{Hours} – число ЧНН в день, $N_{Hours} = 8$;

N_{Days} – число дней в месяце, $N_{Days} = 30$.

В итоге получаем:

$$R_t = 0,275 \text{ Мбит/с.}$$

Среднее значение трафика от базовой станции к абоненту (Downlink – «вниз») в ЧНН:

$$T_{DL} = R_t \cdot S_{DL}, \quad (2.2)$$

где S_{DL} – доля трафика Downlink, $S_{DL} = 70\%$.

Среднее значение трафика от абонента к базовой станции (Uplink - «вверх») в ЧНН:

$$T_{UL} = R_t \cdot S_{UL}, \quad (2.3)$$

где S_{UL} – доля трафика Uplink, $S_{UL} = 30\%$.

В итоге получаем:

$$T_{DL} = 0,193 \text{ Мбит/с, } T_{UL} = 0,083 \text{ Мбит/с.}$$

Предполагаемый диапазон частот для макро базовых станций для линии «вверх» (Uplink) составляет 1710-1785 МГц, для линии «вниз» (Downlink) – 1805-1880 МГц. Ширина частотного спектра равна 75 МГц. Каждому сектору (всего 3) базовой станции выделяется по 20 МГц с учетом защитных частотных полос для неперекрывания сигналов разных секторов.

Емкость (пропускная способность) сети LTE оценивается на основе средних значений спектральной эффективности сот.

Спектральная эффективность представляет собой отношение скорости передачи данных в бит/с на 1 Гц используемой полосы частот (бит/с/Гц). Этот параметр характеризует скорость передачи данных в заданной полосе частот.

Для макросот центральной части типового крупного города в полосе 20 МГц в канале «вниз» передача ведется по схеме MIMO 4x4 в режиме пространственного мультиплексирования, в канале Uplink – 1 x 4. Примем, что распределение абонентов в зоне обслуживания равномерное.

В таблице 2.1 приведены значения средней спектральной эффективности LTE FDD в макросети.

Средняя пропускная способность одного сектора макро базовой станции рассчитывается путем умножения ширины канала на спектральную эффективность канала:

Таблица 2.1 – Средняя спектральная эффективность для сети LTE

Линия	Схема MIMO	Средняя спектральная эффективность, бит/с/Гц
UL	1×2	0,735
	1×4	1,103
DL	2×2	1,69
	4×2	1,87
	4×4	2,67

$$R = S \cdot W \quad (2.4)$$

где S – средняя спектральная эффективность, бит/с/Гц;

W – ширина канала, МГц.

Для линии Downlink («вниз») получаем:

$$R_{DL} = 2,67 \cdot 20 = 53,4 \text{ Мбит/с.}$$

Для линии UL («вверх»):

$$R_{UL} = 1,103 \cdot 20 = 22,1 \text{ Мбит/с.}$$

Средняя пропускная способность базовой станции R_{eNB} равна пропускной способности одного сектора помноженной на количество секторов базовой станции. Поскольку число секторов базовой станции равно 3, получаем:

$$R_{eNB} = R_{DL/UL} \cdot 3 \quad (2.5)$$

Откуда $R_{eNB} = (53,4 + 22,1) \cdot 3 = 226,5 \text{ Мбит/с.}$

Для линии Downlink («вниз»):

$$R_{eNB.DL} = 53,4 \cdot 3 = 160,2 \text{ Мбит/с.}$$

Для линии UL («вверх»):

$$R_{eNB.UL} = 22,1 \cdot 3 = 66,3 \text{ Мбит/с.}$$

Для расчета радиуса соты необходимо определить общее число каналов, выделяемых для развертывания сети LTE.

Весь канальный ресурс разбит на так называемые ресурсные блоки. Один ресурсный блок включает 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих частотную полосу 180 кГц.

Общее число каналов рассчитывается по формуле:

$$N_k = \left[\frac{\Delta f_{\Sigma}}{\Delta f_k} \right] \quad (2.6)$$

где Δf_{Σ} – полоса частот работы сети, $\Delta f_{\Sigma} = 120 \text{ МГц}$;

Δf_k – полоса частот одного радиоканала (ресурсного блока), $\Delta f_k = 180$ кГц.

Получаем:

$$N_k = \left[\frac{120000}{180} \right] = 667 \text{ каналов.}$$

Число каналов $N_{k.sec}$, необходимое для обслуживания абонентов в одном секторе одной соты:

$$N_{k.sec} = \left[\frac{N_k}{N_{cl} \cdot M_{sec}} \right] \quad (2.7)$$

где N_k – общее число каналов;

N_{cl} – размерность кластера, с учетом количества секторов базовой станции, $N_{cl} = 3$;

M_{sec} – количество секторов базовой станции, $M_{sec} = 3$.

$$N_{k.sec} = \left[\frac{667}{3 \cdot 3} \right] = 74 \text{ канала}$$

Число каналов трафика в одном секторе одной соты рассчитывается по формуле:

$$N_{kt.sec} = N_{ktl} \cdot N_{k.sec} \quad (2.8)$$

где N_{ktl} – число каналов трафика в одном радиоканале, определяемое стандартом радиодоступа (для OFDMA $N_{ktl} = 1...3$), для LTE $N_{ktl} = 1$.

Получаем:

$$N_{kt.sec} = 1 \cdot 74 = 74 \text{ канала.}$$

На рисунке 2.1 представлен график модели Эрланга, позволяющий определить допустимую нагрузку в секторе одной соты A_{sec} при заданных вероятности блокировки 1% и рассчитанном значении $N_{kt.sec}$.

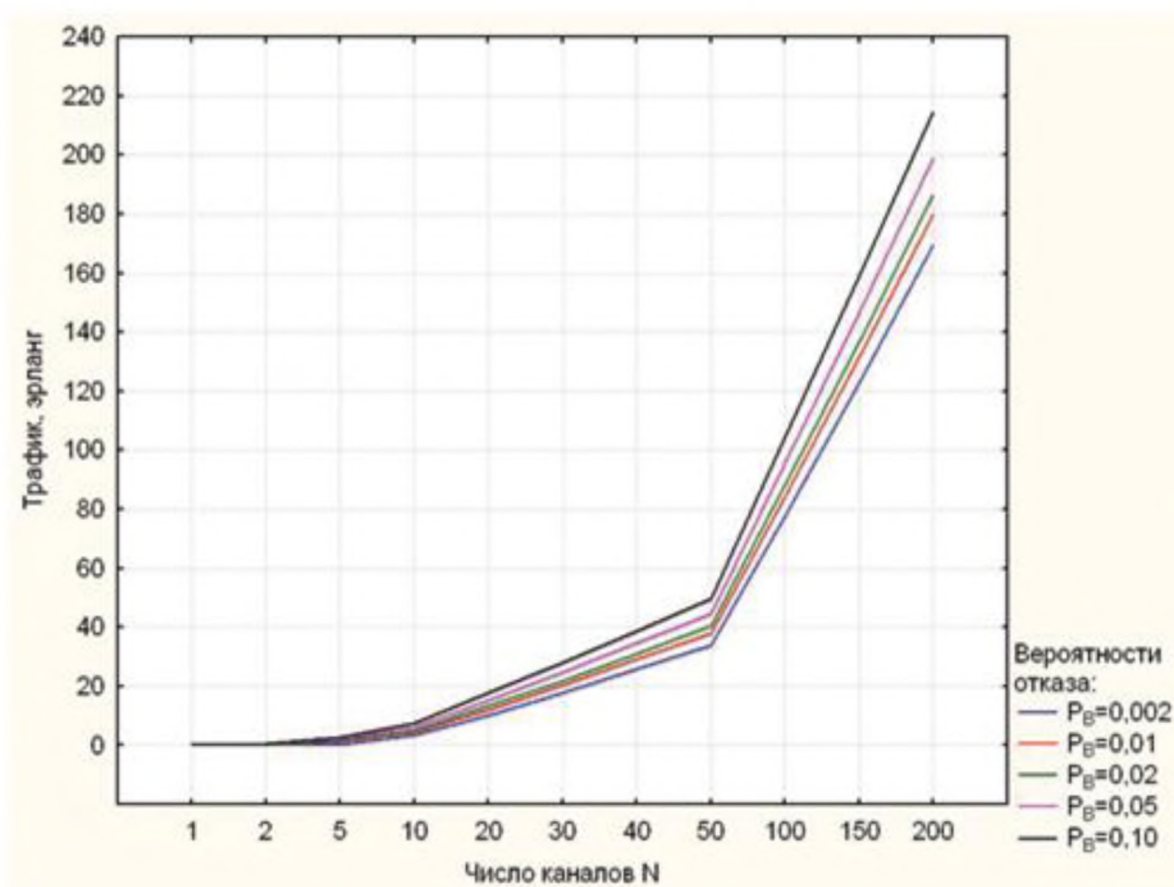


Рисунок 2.1 – Зависимость допустимой нагрузки в секторе от числа каналов трафика и вероятности блокировки

По графику на рисунке 2.1, $A_{sec} = 62,2$ Эрл.

Допустимая нагрузка в секторе одной соты при заданных вероятности блокировки 1% и рассчитанном значении $N_{kt.sec}$ $A_{sec} = 62,2$ Эрл.

Число абонентов, обслуживаемое одной базовой станцией, определяется по формуле:

$$N_{аб.еNB} = M_{sec} \cdot \left[\frac{A_{sec}}{A_I} \right] \quad (2.9)$$

где A_I – средняя абонентская нагрузка от одного абонента по всем видам трафика.

Значение A_I может колебаться в диапазоне 0,04...0,2 Эрл. Для активных пользователей центра типового крупного города и высокоскоростного обмена данными, примем $A_I = 0,2$ Эрл. Таким образом:

$$N_{аб.еNB} = 3 \cdot \left[\frac{62,2}{0,2} \right] = 933 \text{ абонента.}$$

Для проверки правильности расчетов оценим суммарный трафик от абонентов соты в ЧНН следующим образом:

Определим общий трафик проектируемой сети в ЧНН $R_{общ.}/\text{ЧНН}$ по формуле:

$$R_{\Sigma,еNB} = R_t \cdot N_{акт.аб} \quad (2.10)$$

где $N_{акт.аб}$ – число активных абонентов в соте, зададим как 80% от общего числа потенциальных абонентов соты, $N_{акт.аб} = 747$ абонентов.

В итоге получаем:

$$R_{\Sigma,еNB} = 0,275 \cdot 747 = 205,5 \text{ Мбит/с/}$$

То есть, $R_{\Sigma,еNB} < R_{еNB} = 226,5$ Мбит/с, что говорит о том, сеть не будет подвергаться перегрузкам в ЧНН.

При количестве пользователей 1880 на 1 км², площадь покрытия одной макросоты будет оставлять $S_{macro,еNB} = 933 / 1880 = 0,496$ км², что определяет радиус макросоты $r_{macro,еNB} = 0,398$ км.

Однако, теоретически радиус макросоты может достигать 13,4 км. Чтобы увеличить радиус макросоты для условий центра типового крупного города, предполагается развертывание гетерогенной сотовой сети. В этом случае в макросоту добавляются несколько микросот, которые берут на себя обслуживание части абонентов, находящихся в зоне действия макросоты. Для этого выделяется полоса частот 7 диапазона 2600 МГц FDD, а именно: частоты от 2510 до 2530 МГц для канала uplink и частоты от 2630 до 2650 МГц для канала downlink.

Проведя расчеты согласно формулам (2.1)–(2.10), получаем число абонентов, обслуживаемое одной микро базовой станцией, равное $N_{аб.еNB} = 296$.

Таким образом, макросота может быть разгружена переводом части абонентов на обслуживание ближайшей микросотой. Например, размещение в одной макросоте шести микросот позволит увеличить емкость макросоты на $6 \cdot 296 = 1776$ абонентов и составит 2709 абонентов. При количестве пользователей 1880 на 1 км², площадь покрытия одной макросоты будет оставлять $S_{\text{макро.базовая станция}} = 2709 / 1880 = 1,44$ км², что определяет радиус макросоты $r_{\text{макро.базовая станция}} = 0,677$ км.

2.2 Критерии выбора сот в гетерогенных сотовых сетях LTE

Широко известно, что большая часть электроэнергии в сотовых сетях потребляется макро базовыми станциями. Исследования на эту тему часто показывают, что потенциальная экономия электроэнергии в значительной степени зависит от того, как система реагирует на запросы пользователей. Существенное снижение мощности возможно в тех случаях, когда абоненты перемещаются к отдельным предпочтительным базовым станциям, чтобы создать возможность для отключения других станций. Однако после внедрения технологии LTE были предложены и реализованы основанные на ней механизмы выбора сот абонентскими устройствами. Но до сих пор они не принимались во внимание при рассмотрении вопросов энергопотребления. Кроме того, современные ученые

уверены, что перемещение трафика с потребляющих большое количество электроэнергии макро базовых станций к потребляющим значительно меньшее количество электроэнергии микро базовым станциям, покрывающим меньшую территорию, может улучшить общее качество обслуживания абонентов.

Из преимуществ, которые дает использование гетерогенных сотовых сетей не может быть получена существенная выгода если система не использует корректную методику выбора сот абонентскими устройствами. Процесс выбора соты заключается в том, что абонентские устройства подключаются к макро базовой станции или микро базовой станции, используя информацию об уровне сигнала. Баланс трафика и максимизация пропускной способности являются ключевыми целями процесса выбора сот. В гомогенных сетях выбор сот осуществляется проще, поскольку все базовые станции обладают одинаковой мощностью передачи данных. В таком случае абонентские устройства подключаются к станции с наилучшим уровнем сигнала. При равномерном распределении пользователей внутри соты это позволяет сбалансировать нагрузку между базовыми станциями. Но в гетерогенных сетях макро базовые станции и микро базовые станции характеризуются разной мощностью передачи, и потому применение подходов, применяемых в гомогенных сетях не приносит желаемого результата.

При использовании существующих подходов слишком много пользователей могут подключаться к одной и той же базовой станции, оставляя для каждого из них небольшой доступную полосу пропускания. Это приводит к выводу о необходимости способа выбора сот, целью которого будет сбалансировать количество абонентов, подключенных к макро базовым станциям и микро базовым станциям. Главной причиной возникновения существенного дисбаланса является разница в мощности сигнала от макро базовых станций и микро базовых станций. В работах [25, 29, 50, 53] предлагается ввести величину логической компенсации при принятии решения о выборе соты, чтобы абонентские устройства подключались к микро базовым станциям даже в случае, когда сигнал от макро базовой станции более сильный. В результате трафик перенаправится к

микро базовым станциям, полоса пропускания будет использоваться более рационально, а спектральная эффективность увеличится. Но при таком подходе повышение энергосбережения существенно зависит от определения величины логической компенсации. Если она окажется слишком малой, то большинство абонентских устройств останутся подключенными к макро базовой станции, что приведёт к снижению производительности сети для большинства абонентских устройств. С другой стороны, если эта величина будет слишком велика, то абонентские устройства, находящиеся на большом отдалении от микро базовой станции будут сталкиваться со значительной интерференцией из-за значительного расстояния до базовой станции. В работах [52,81] описан метод, использующий адаптивную величину логической компенсации, основанную на изменяющихся во времени распределении абонентских устройств и уровнях запросов пользователей. В любом случае применение методик с логической компенсацией не позволяет получить сбалансированную гетерогенную сотовую сеть, которая будет в равной мере использовать частотный диапазон макро базовых станций и микро базовых станций. Для достижения лучших результатов следует более глубоко рассмотреть критерии выбора сот в гетерогенных сотовых сетях. Для поддержания качества обслуживания пользователей на заданном уровне необходимо комплексно проанализировать производительность сети с точки зрения достижимой скорости передачи для абонентских устройств и возможность снижения потребления электроэнергии.

В настоящее время выделяют четыре основные критерия выбора сот в гетерогенных сотовых сетях четвертого поколения LTE:

- критерий выбора сот по расстоянию;
- критерий выбора сот по уровню сигнал/шум;
- критерий выбора сот по полосе пропускания;
- критерий выбора сот по энергосбережению.

2.2.1 Критерий выбора сот на основе расстояния

Если гетерогенная сеть LTE использует критерий выбора сот на основе расстояния, пользовательское оборудование подключается к конкретной малой базовой станции, когда оно находится в пределах заданного географического расстояния от малой базовой станции независимо от расстояния до макро базовой станции и от соотношения сигнал/шум SNR получаемого сигнала от макро базовой станции и микро базовой станции [64]. Предполагается, что покрытие микро базовой станции определяется эффективным радиусом соты микро базовой станции. На рисунке 2.2 показан пример макросоты с круговым покрытием радиуса 500 метров, эффективный радиус микросот составляет 50 метров, общее количество абонентских устройств, подключенных к разным базовым станциям, составляет 120 единиц.

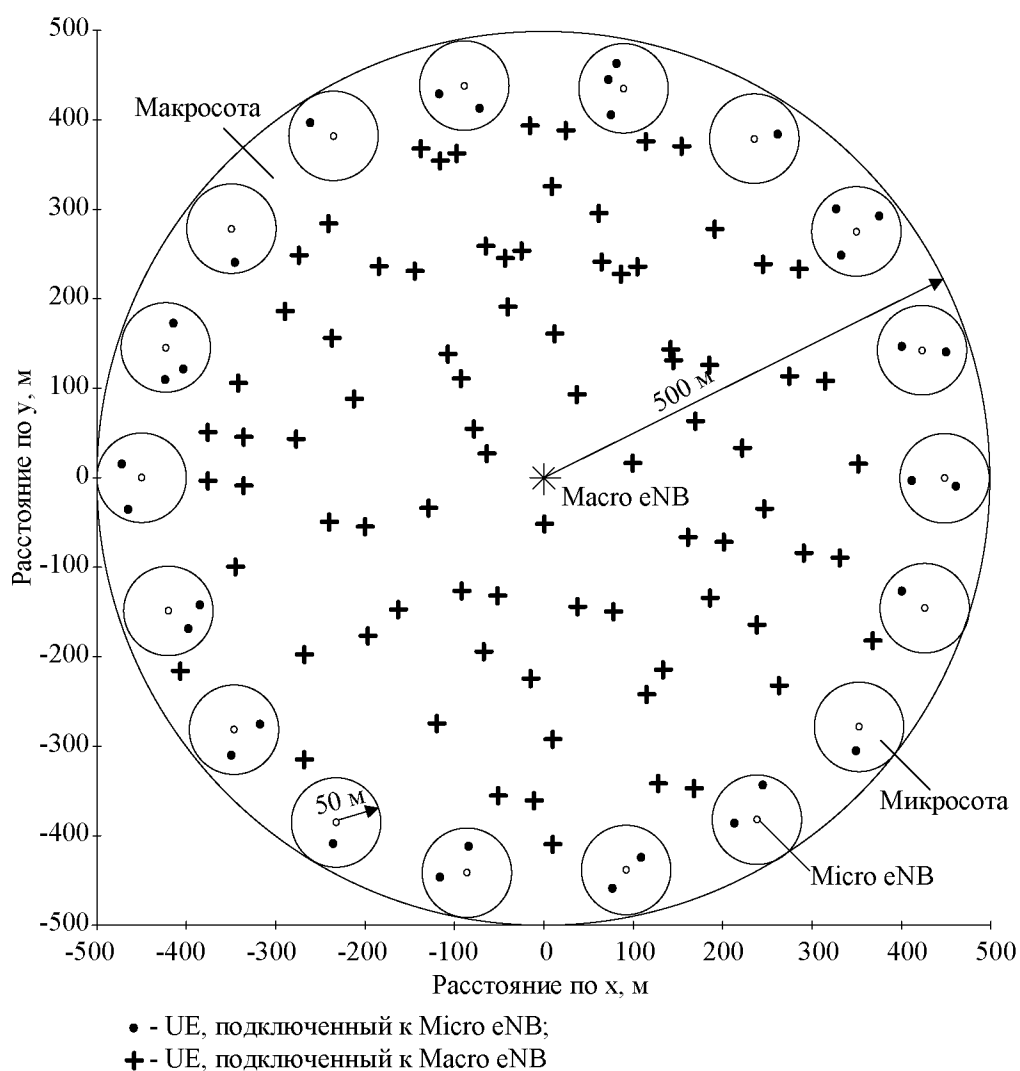


Рисунок 2.2 – Пример подключения UE по критерию выбора соты по расстоянию

2.2.2 Критерий выбора сот по уровню сигнал/шум

В случае критерий выбора сот по уровню сигнал/шум мобильные устройства подключаются к базовой станции, который имеет самый высокий уровень отношения сигнал/шум – SNR, независимо от расстояния между абонентским устройством и базовой станцией. Этот критерий дает максимально возможную достижимую скорость передачи данных.

Рассмотрим сеть LTE, состоящую из базовых станций в количестве N^{eNB} , поддерживающих пользователей в количестве N_{ab} . При выборе сот на основе SNR пользовательское оборудование UE_i , где $i \in \{1, \dots, N_{ab}\}$, подключается к базовой станции eNB_j , имеющей самый высокий уровень SNR, где $j \in \{1, \dots, N^{eNB}\}$. Таким образом, базовая станция eNB_j^i выбирается UE_i по условию:

$$eNB_j^i = \max_j \{SNR_j^i\}, \quad (2.11)$$

где SNR_j^i – уровень SNR, измеренный UE_i от базовой станции j .

В рассматриваемой гетерогенной сети базовые станции имеют различные уровни мощности передачи: макро базовые станции работают с высоким уровнем мощности, и микро базовые станции – с низким уровнем мощности.

Поскольку макро базовая станция передает сигнал на значительно более высоком уровне мощности, чем микро базовая станция, большинство абонентских устройств будут концентрироваться в макросоте.

Таким образом, абонентские устройства стремятся подключаться к макро базовой станции, оставляя микро базовые станции не полностью используемыми. Чтобы лучше использовать микро базовые станции, были предложены критерии с добавлением некоторого значения смещения ΔSNR_j к SNR от микро базовой станции для увеличения логического уровня мощности сигнала микро базовой

станции. Это приводит к тому, что UE_i выбирает базовую станцию с наибольшим SNR_j^i плюс смещение:

$$eNB_j^i = \max_j \{SNR_j^i + \Delta SNR_j\} \quad (2.12)$$

Значение ΔSNR_j равно нулю для макро базовой станции и обычно выбирается в диапазоне 2-20 дБ для микро базовой станции. Как показано на рисунке 2.3, добавление установленного значения смещения к показателю уровня принимаемого сигнала RSSI (Received Signal Strength Indicator) увеличивает диапазон географического охвата микро базовой станции, и, следовательно, к ней подключается большее количество абонентских устройств, что делает сеть более сбалансированной. По мере увеличения количества абонентских устройств, подключающихся к микро базовой станции, увеличивается пропускная способность сети и общая скорость передачи данных. Однако такое улучшение зависит от выбранных значений смещения.

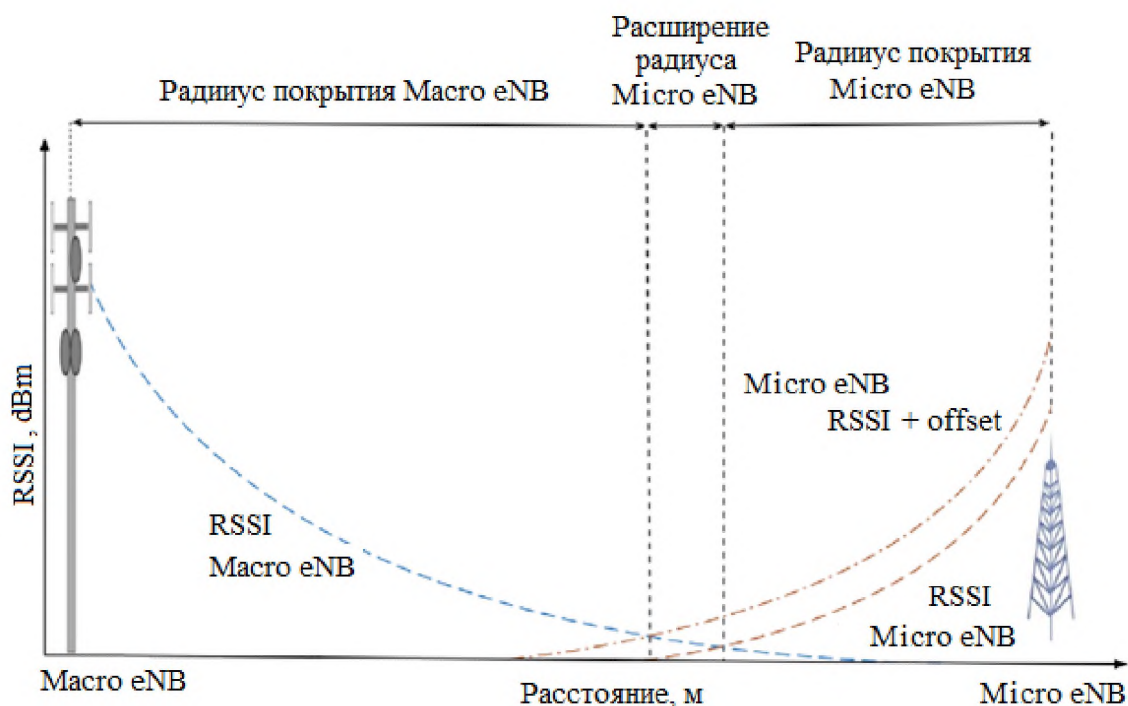


Рисунок 2.3 – Расширение диапазона обслуживания микро базовой станции

Если заданное значение смещения слишком мало, большинство абонентских устройств по-прежнему будут выбирать макро базовую станцию, что приведет к низкой эффективности его разгрузки. С другой стороны, когда заданное значение смещения слишком велико, абонентские устройства будут выбирать микро базовую станцию, даже если они имеют плохой SNR, и эффективность пострадает.

Однако, в результате абонентские устройства, которые подключаются к микро базовой станции, могут получать больше доступной пропускной способностью и, следовательно, более высокую достижимую скорость передачи данных. На рисунках 2.4 – 2.5 показан пример подключения абонентских устройств к базовой станции с использованием критерия выбора сот на основе SNR. На рисунке 2.4 с нулевым смещением (0 дБ), на рисунке 2.5 – со смещением 5 дБ.

Таким образом, при изменении логически заданного значения смещения, абонентские устройства будут подключаться к микро базовой станции даже при условии, что от макро базовой станции они получают более мощный сигнал. Таким образом, изменяя значения смещения, можно увеличить радиус микросот. В результате, трафик перенаправляется к микро базовым станциям, пропускная способность микросот используется больше, а спектральная эффективность возрастает. Следовательно, перевод трафика с мощных узлов (макро базовые станции) на маломощные узлы (микро базовые станции), обеспечивающих меньшее покрытие, может улучшить общее качество обслуживания в сети.

Однако, такое улучшение в значительной степени зависит от корректного выбора значения смещения. Если это значение слишком мало, большинство абонентских устройств останется подключенными к макро базовым станциям, что определит более низкую производительность сети для большинства абонентских устройств. То есть, если к одной и той же базовой станции подключается слишком много пользователей, для каждого из них становится доступной небольшая полоса пропускания. С другой стороны, когда значение смещения

слишком велико, каналы связи тех абонентских устройств, которые находятся далеко от микро базовых станций, будут испытывать большие помехи.

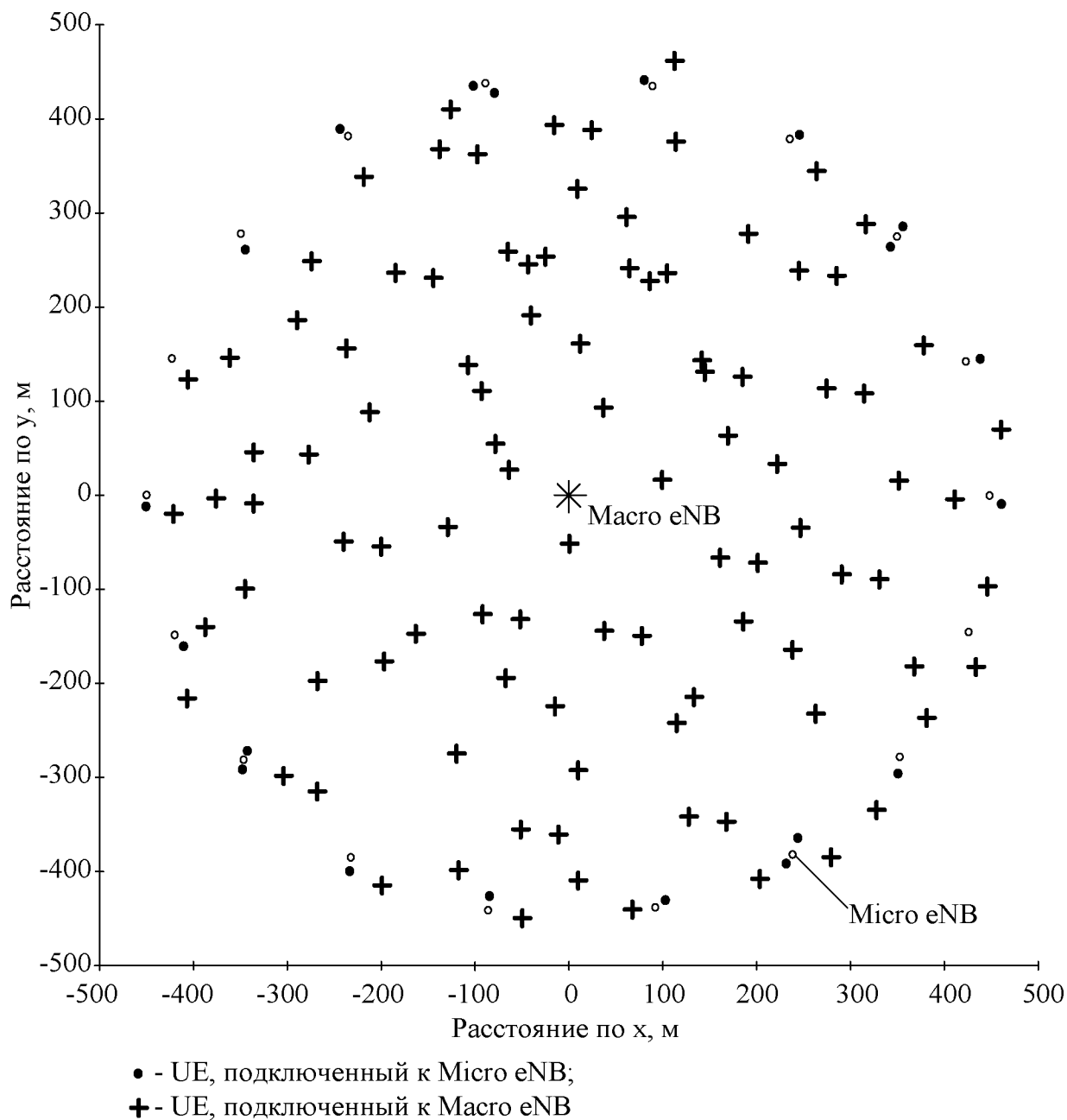


Рисунок 2.4 – Пример подключения по критерию выбора соты на основе SNR при смещении 0 дБ

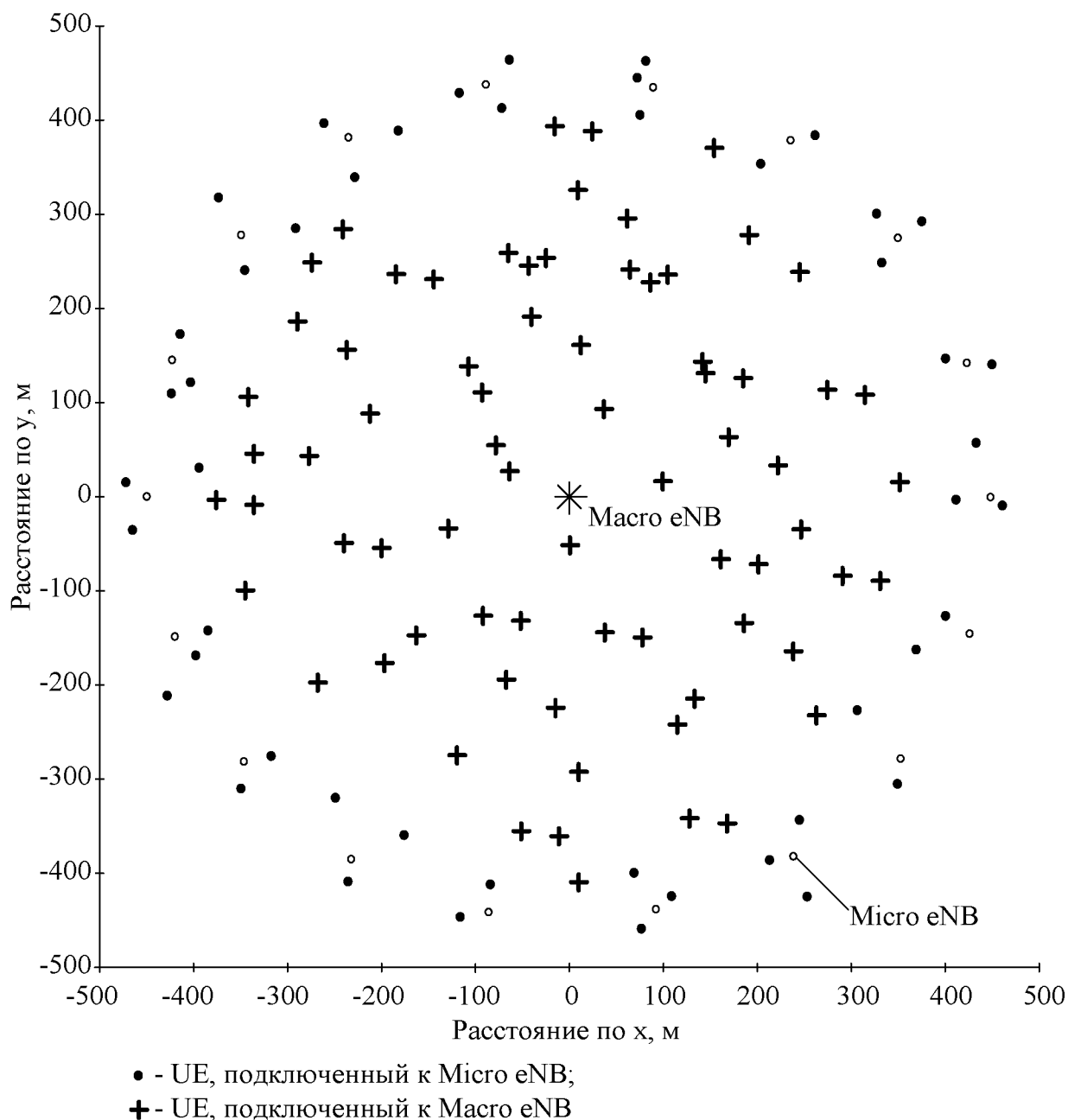


Рисунок 2.5 – Пример подключения по критерию выбора соты на основе SNR при смещении 5 дБ

Однако, данный способ не может обеспечить сбалансированность гетерогенные сети LTE, когда доступная пропускная способность используется равномерно как для макро, так и для микро базовых станций.

Поэтому, чтобы поддерживать высокий уровень обслуживания, необходимо учитывать, как производительность сети с точки зрения достижимой скорости

передачи данных для всех пользователей, так и возможность сокращения потребляемой энергии.

Таким образом, при выборе сот на основе SNR возникают проблемы перегрузки пользователей из макро в микро базовые станции.

2.2.3 Критерий выбора сот по полосе пропускания

При использовании для выбора базовой станции критерий на основе SNR, в большинстве случаев остается много абонентских устройств, подключенных к макро базовой станции. Это связано с большей площадью, покрываемой ей и более высокой мощностью передаваемого сигнала. Поскольку макро базовые станции потребляют большую часть энергии, для снижения энергопотребления можно увеличить количество абонентских устройств в микросотах и оставить меньше абонентских устройств в макросотах.

Критерий выбора сот на основе ширины полосы пропускания позволяет более равномерно распределять доступный ресурс в гетерогенной сети и создает больше возможностей для минимизации трафика в макро базовой станции и, как следствие, снижения энергопотребления в ней.

Также, при использовании критерия по SNR абонентские устройства могут группироваться в одной или нескольких базовых станциях, а, поскольку полоса пропускания них является общей для абонентских устройств, подключенные абонентские устройства могут снижать доступную полосу пропускания и достижимую скорость передачи данных. Кроме того, при таком критерии базовые станции должны работать на полную мощность. Поскольку имеются перегруженные базовые станции, есть и другие базовые станции, которые имеют более широкую доступную полосу пропускания, которая разделяется меньшим количеством абонентских устройств. Концепция самоорганизующейся сети (SON) [3] предполагает, чтобы как макро, так и микро базовые станции, в одной и той же зоне обслуживания взаимодействовали между собой и обменивались информацией о своем состоянии.

В этом случае система, используя обмен информацией о трафике между базовыми станциями, может перераспределять трафик так, чтобы экономилась потребляемая энергия [60, 74].

Цель критерия выбора сот по полосе пропускания состоит в том, чтобы переместить абонентские устройства из перегруженных базовых станций в менее нагруженные, чтобы получить выгоду из более широкой доступной полосы пропускания и создать возможности для макро базовых станций не работать на полную мощность. Предположим, что все абонентские устройства получают одинаковую пропускную способность и одинаковый тип сервиса. Производительность сети и качество обслуживания измеряются путем сравнения достижимой пользователем скорости передачи данных со средней скоростью передачи данных при работе только с макро базовой станцией.

Алгоритм работы критерия представлен на рисунке 2.6.

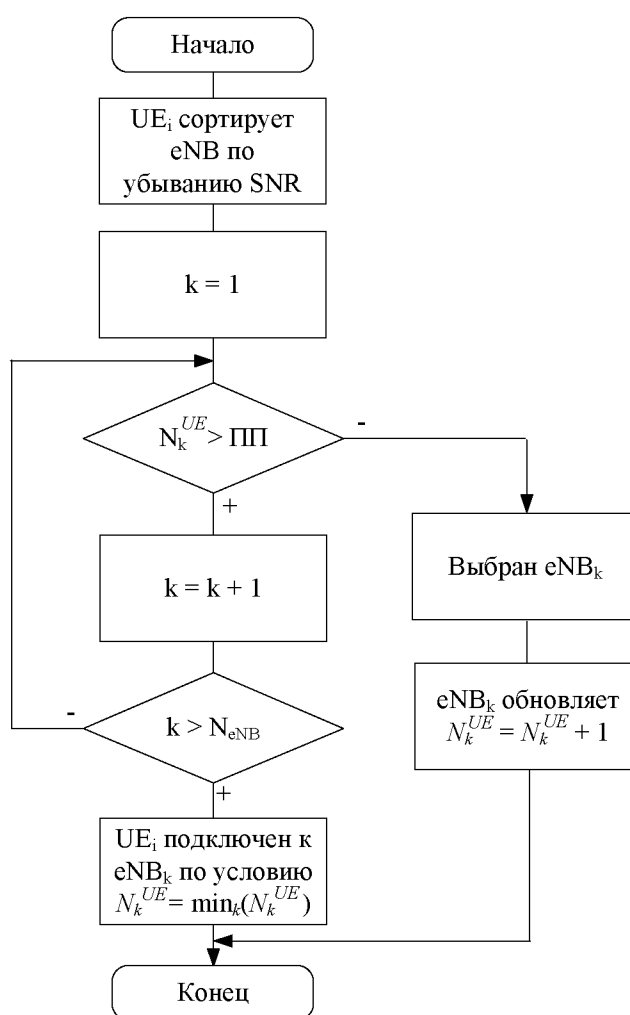


Рисунок 2.6 – Алгоритм на основе критерия выбора соты по полосе пропускания

Абонентский терминал UE_i определяет самый высокий уровень SNR от всех базовых станций, сортирует их по убыванию и запрашивает подключение к базовой станции, которая обеспечивает самый высокий SNR ($eNB_k, k = 1$).

Базовая станция обрабатывает запрос и устанавливает соединение, если количество подключенных абонентских устройств N_k^{UE} не превышает некоторого порога (ПП). ПП устанавливается равным общему количеству абонентских устройств в зоне обслуживания, деленному на число базовых станций N_{UE} / N_{eNB} . Затем выбранная eNB_k обновляет количество подключенных пользователей N_k^{UE} . Если UE_i получает отказ, то попытается подключиться к базовой станции, которая обеспечивает следующий самый высокий уровень SNR. Если все варианты получили отказ, базовые станции ($eNB_k, k = 1, 2, \dots, N_{eNB}$) будут принимать решение в соответствии с количеством подключенных абонентских устройств и подключать абонентский терминал UE_i к той базовой станции, которая может обеспечить наиболее доступную полосу пропускания или наименьшее количество подключенных пользователей $\min_k(N_k^{UE})$.

Пример подключений между абонентскими устройствами и базовыми станциями с выбором соты на основе полосы пропускания в соте с радиусом 500 метров, в общей сложности 200 единиц абонентских устройств, одна макро базовая станция и 18 микро базовых станций, распределенных на 50 метров по краю соты, представлен на рисунке 2.7.

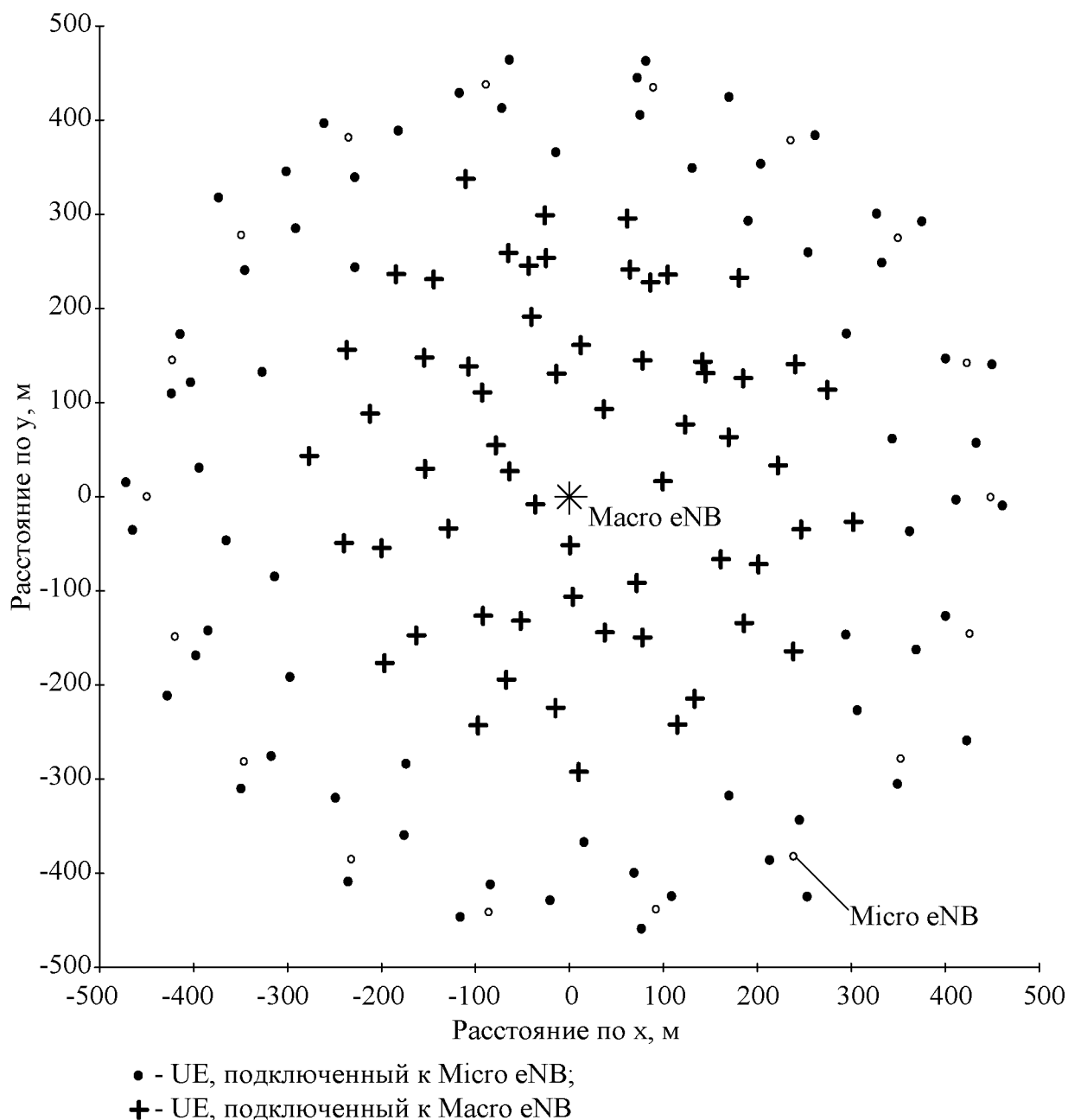


Рисунок 2.7 – Пример подключения на основе критерия выбора сот по полосе пропускания

Таким образом, выбор сот можно осуществлять на основе полосы пропускания, учитывая количество пользователей для каждой базовой станции в дополнение к SNR. Учет полосы пропускания может решить проблему перегрузки пользователя в макро базовой станции в часы средней и высокой нагрузки и создать возможности для макро базовой станции для снижения энергопотребления. Однако в часы низкой нагрузки использование этого

критерия имеет недостаток. Выбор сот балансирует нагрузку между макро и микро базовыми станциями независимо от общего спроса. В некоторых случаях общий спрос может быть настолько низким, что не требуется, чтобы микро базовые станции были активными. Все пользователи могут подключаться к макро базовой станции и получать услуги на удовлетворительном уровне.

2.2.4 Критерий выбора сот по энергосбережению

Целью критерия выбора сот по энергосбережению является создание возможности максимально снизить общее потребление энергии за счет максимально возможного выключения микро базовых станций и обеспечения достаточного уровня обслуживания абонентов только при помощи макро базовых станций.

Микро базовые станции должны работать в течение более длительного периода, чтобы обслуживать пользователей. В зависимости от количества микро базовых станций, установленных в сети, большее число работающих микро базовых станций может более существенно влиять на общее энергопотребление, увеличивая его, чем экономия энергии при понижении мощности макро базовых станций. Кроме того, поскольку макро базовые станции действуют как покрывающие базовые станции, они должны поддерживать свою работу на определенном уровне в любое время независимо от объема трафика. Но, эта работа может быть на минимальном уровне энергопотребления.

Рассмотрим период низкой нагрузки, когда несколько пользователей используют пропускную способность макро базовой станции и им может быть выделен значительный ресурс. Большой объем ресурсов уменьшает необходимость высокой мощности передачи от макро базовой станции. Следовательно, на минимальном уровне энергопотребления макро базовые станции могут предоставлять услуги для небольшого числа пользователей с минимальной мощностью передачи. Кроме того, в таких случаях можно выключать микро базовые станции и снижать общее потребление энергии в сети.

Подобным образом работает критерий выбора сот по принципу энергосбережения, целью которого является создание возможности максимально снизить общее потребление энергии за счет максимально возможного выключения микро базовых станций и обеспечения достаточного уровня обслуживания абонентского оборудования только при помощи макро базовых станций [42].

Рассмотрим сеть гетерогенную сеть LTE, которая содержит базовые станции eNB_j , где $j \in [1, N^{eNB}]$ и N^{eNB} – общее количество базовых станций в гетерогенной сети. Гетерогенная сеть LTE содержит одну центральную базовую станцию, которая является макро базовой станцией, обозначенной как eNB_1 . Остальные базовые станции являются микро базовыми станциями и обозначаются как eNB_j , где $j \in [2, N^{eNB}]$. Обозначим i -й абонентский терминал в момент времени t через UE^i , где $i \in [1, N_t^{UE}]$.

Учитывая модифицированную формулу мощности Шеннона:

$$C = 0,75 \cdot B \cdot \log\left(1 + \frac{SNR}{1,25}\right) \quad (2.13)$$

где B – полная полоса пропускания.

определяется ресурсный блок (RU – ResourceUnit) как процент использования ресурса спектра как во временной, так и в частотной области:

$$RU = \frac{reqC}{0,75 \cdot \log\left(1 + \frac{SNR}{1,25}\right)} \quad (2.14)$$

где $reqC$ – запрашиваемая скорость передачи данных по требованию пользователя.

Согласно (2.14), требуемый RU для UE^i это RU^i , когда запрашиваемая услуга требует достижимой скорости передачи данных $reqC^i$ и соотношения сигнал/шум $reqSNR^i$. При использовании критерия выбора сот по энергосбережению, к макро базовой станции подключаются и предоставляются услуги всем пользователям, когда выполняются два условия.

Макро базовая станция eNB_1 должна предоставить услугу всем пользователям:

$$\sum_{i=1}^{N^{UE}} RU^i < 100\% \quad (2.15)$$

SNR, которые все пользователи получают при минимальной мощности передачи макро базовой станции, должны соответствовать требованию:

$$SNR_1^i \geq reqSNR^i \quad (2.16)$$

Если одно из условий не выполняется, макро базовая станция может переключиться на критерий выбора соты по полосе пропускания и включить соседние микро базовые станции. Когда все абонентские устройства подключаются к макро базовой станции по критерию выбора сот по энергосбережению, можно отключить все микро базовые станции, то есть для всех микро базовых станций $b = 0$, чтобы минимизировать общее потребление энергии в соответствии с (1.6). Кроме того, для снижения общего потребления энергии можно уменьшить QoS ($reqC^i$) для некоторых пользователей, чтобы оставить мощность передачи макро базовой станции на минимуме. Макро базовая станция должна увеличить свою мощность передачи для увеличения SNR_1^i , чтобы компенсировать ограничение, если число пользователей увеличивается. Кроме

того, благодаря снижению QoS система может поддерживать общее количество

$\sum_{i=1}^{N_r^{UE}} RU^i$ до 100% и воздерживаться от включения микро базовых станций.

На рисунке 2.8 и рисунке 2.9 показаны примеры соединений между абонентскими устройствами и базовыми станциями с энергосберегающим выбором сот в соте с радиусом 500 метров в часы низкой нагрузки с общим количеством 40 единиц абонентских устройств и в часы большой нагрузки с количеством 200 единиц абонентских устройств. В примере одна макро базовая станция и 18 микро базовых станций, распределенные на 50 метров от края соты.

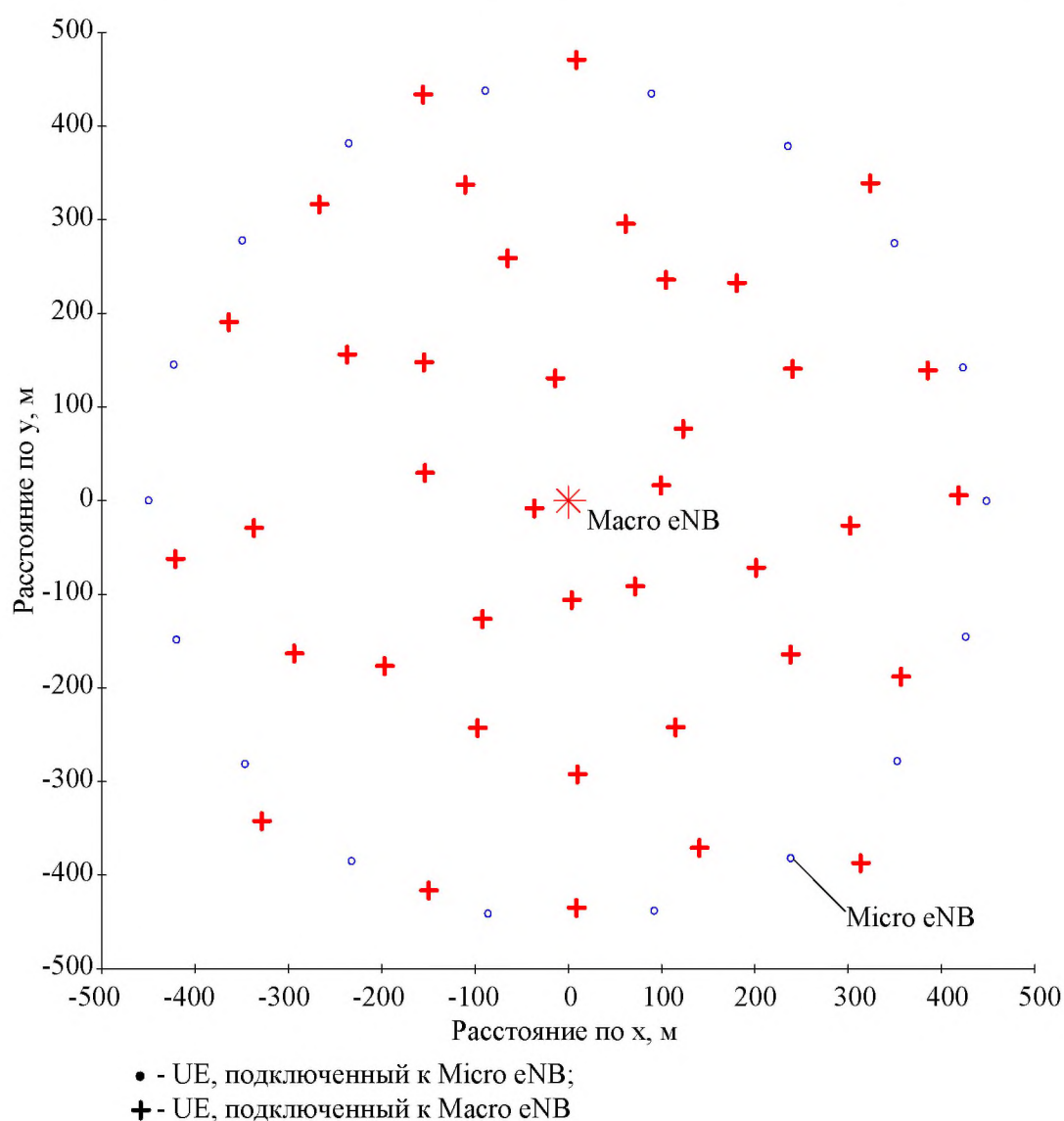


Рисунок 2.8 – Пример подключения по критерию энергосберегающего выбора сот в течение незагруженных часов

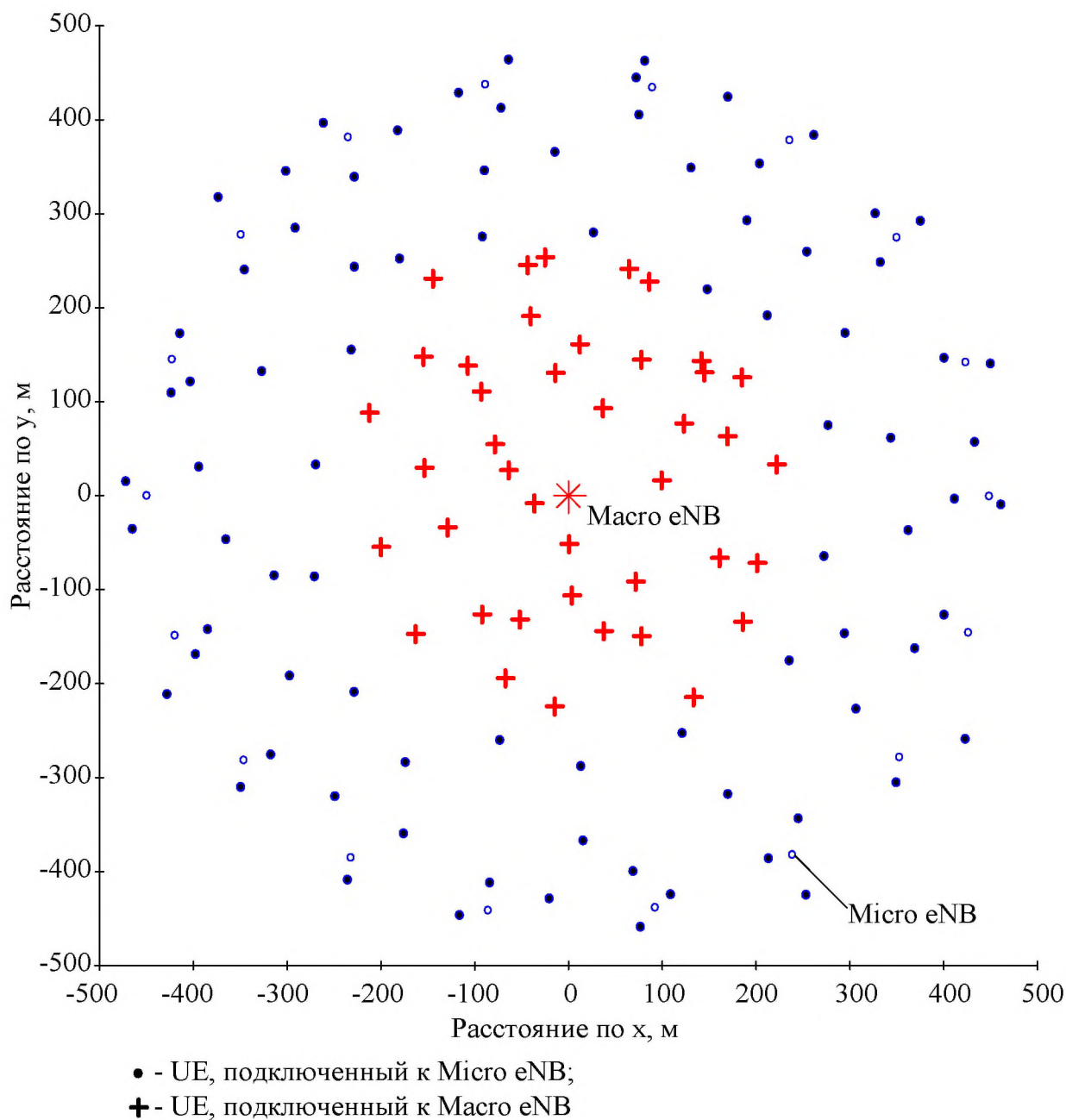


Рисунок 2.9 – Пример подключения по критерию энергосберегающего выбора сот в нагруженные часы

На рисунке 2.8 показано, что в часы низкой нагрузки все абонентские устройства подключаются к макро базовой станции, тогда как на рисунке 2.9 представлены аналогичные соединения с критерием выбора сот по полосе пропускания.

Последние два критерия влияют на минимизацию потребления энергии в сети доступа LTE. В обоих критериях осуществляется управление трафиком так,

чтобы обеспечить максимальную возможность снижения энергопотребления в базовой станции при сохранении качества обслуживания для пользователей.

2.3 Моделирование критериев выбора сот для условий гетерогенной сети центра крупного города

Для оценки эффективности критериев выбора сот: на основе расстояния (обозначим через M_P), на основе SNR (M_{SNR}), на основе полосы пропускания ($M_{ПП}$) и по энергосбережению ($M_{ЭС}$) проведено имитационное моделирование. Для оценки используется участок сети, содержащий одну соту, охватываемую одной макро базовой станцией с радиусом покрытия 680 метров и шестью микро базовыми станциями, развернутыми на расстоянии в 450-550 метрах от макро базовой станции.

Общее число пользователей изменяется от 200 до 2400. При этом предполагается, что каждое место с высоким спросом генерирует дополнительные 10% пользователей. Например, когда в общей области соты присутствует 1000 пользователей, каждое место с высоким спросом будет содержать 100 пользователей. Общее количество пользователей в соте составит 1600 пользователей ($1000 + (0,1 \times 1000 \times 6) = 1600$). Общее местоположение пользователей равномерно распределяется по всей соте, дополнительные пользователи с высоким спросом распределяются равномерно по местоположению микро базовой станции.

При моделировании учитываются различные уровни спроса на услуги для которых определяются требования к скорости передачи данных 8 Мбит/с, 5 Мбит/с, 3 Мбит/с, 2 Мбит/с для FullHD видео, HD-видео, SD-видео и HTTP соответственно. Вероятность того, что пользователь запросит каждый тип услуги, составляет 0,05, 0,15, 0,25, 0,5 при максимальной нагрузке в 0,2 Эрл.

Макро базовая станция передает сигнал с мощностью 46 дБм на полосе 1800 МГц, микро базовые станции работают на частоте 2,6 ГГц с мощностью передачи

30 дБм. Для вычисления потери на трассе для макро базовой станции используется модель Окамура-Хата для городов:

$$L_p = 69,55 + 26,16 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot \log(hb) - a_{hm} + (44,9 - 6,55 \cdot \log(hb) \cdot \log(d)) \quad (2.17)$$

где L_p – потери на трассе, дБ;

f – частота, $f = 1800$ МГц;

hb – высота, м;

d – расстояние между макро базовой станцией и абонентом, км.

Коэффициент a равен:

$$a = 3,2 \cdot (\log(11,75 \cdot hm))^2 - 4,97 \quad (2.18)$$

Для микро базовой станции потери на трассе вычисляются в соответствии с базовыми параметрами моделирования гетерогенной системы 3GPP для наружной зоны, модель 1 для 2 ГГц абонентского устройства:

$$L_p = 140,7 + 36,7 \cdot \log_{10}(d) \quad (2.19)$$

Предоставляемая пользователям скорость передачи данных $ExpC$ вычисляется в соответствии с модифицированной для LTE формулой Шеннона.

На рисунке 2.10 приведен график процентного изменения количества пользователей, подключенных к микро базовым станциям по отношению к общему количеству активных пользователей соты.

При использовании критерия выбора сот на основе расстояния (M_R), абонент подключаются к микро базовым станциям, когда они находятся на заданном расстоянии от микро базовой станции независимо от расстояния от макро базовой станции. Предполагается, что покрытие микро базовой станции определяется эффективным радиусом соты микро базовой станции. Это число может меняться. Исходя из результатов моделирования, процент пользователей микро базовой станции составляет около 89%.

При использовании критерия выбора сот на основе SNR, абонент выбирает подключение к той базовой станции, которая может обеспечивать самый высокий SNR независимо от расстояния между абонентом и базовой станцией.

Поскольку макро базовая станция передает сигнал на более высоком уровне мощности, путем выбора базовой станции на основе только SNR, большинство абонентских устройств будут концентрироваться в макросоте.

Для увеличения логического уровня мощности сигнала введено смещение. Это позволяет повысить уровень сигнала от микро базовой станции и привлечь больше абонентов к микро базовой станции, что делает сеть более сбалансированной. В результате абонентские устройства, которые подключаются к микро базовой станции, могут обладать большей доступной пропускной способностью и, следовательно, более высокой достижимой скоростью передачи данных. Однако, здесь важно правильно выбрать уровень смещения.

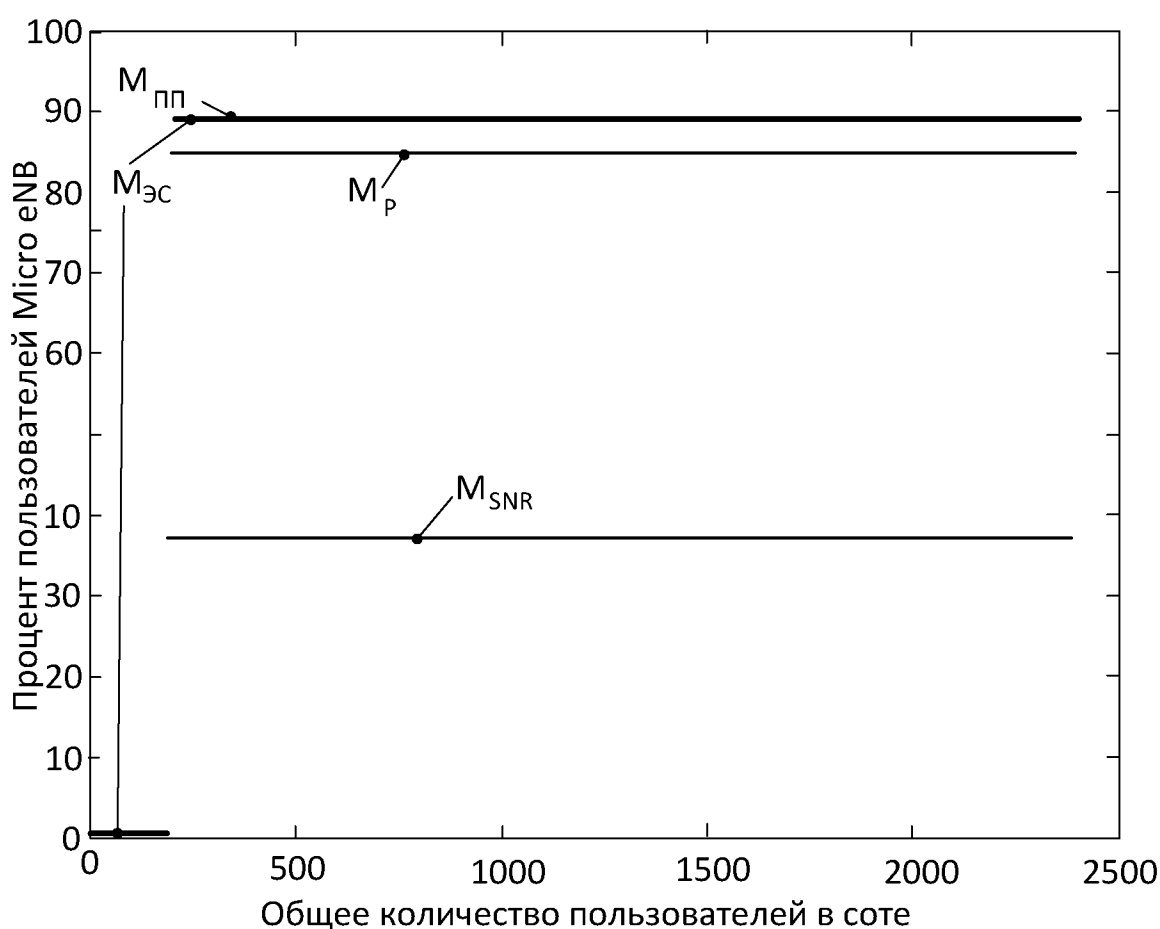


Рисунок 2.10 – Процент пользователей микро базовых станций для различных критериев выбора сот

По сравнению с M_P и M_{SNR} , критерии выбора сот на основе полосы пропускания ($M_{ПП}$) и по энергосбережению ($M_{ЭС}$) имеют более высокий процент пользователей микро базовых станций. Более высокая доля пользователей микро базовых станций дает большую возможность снизить потребление энергии в макро базовой станции, потому что она должна предоставлять услуги меньшему числу пользователей. Кроме того, когда общее количество пользователей невелико и нет пользователей микро базовых станций, макро базовая станция может предоставлять услуги всем пользователям до тех пор, пока общее число пользователей не увеличится более чем на 200.

Рассмотрим влияние критериев выбора сот на достижимую скорость передачи данных.

На рисунке 2.11 показан график зависимости достижимой скорости передачи данных от количества активных пользователей для четырех критериев выбора сот для макро базовой станции. На рисунке 2.12 приведен аналогичный график для микро базовых станций. На рисунке 2.13 приведен график зависимости средней достижимой скорости передачи данных от количества активных пользователей соты в целом.

Из рисунка 2.11 видно, что большинство пользователей, которые подключаются к макро базовой станции по критерию SNR, получают низкую достижимую, скорость передачи данных, поскольку полоса пропускания макро базовой станции при большом количестве пользователей в макросоте ограничена.

При критериях выбора сот на основе полосы пропускания и по энергосбережению обеспечивается сопоставимая скорость передачи данных для всех пользователей.

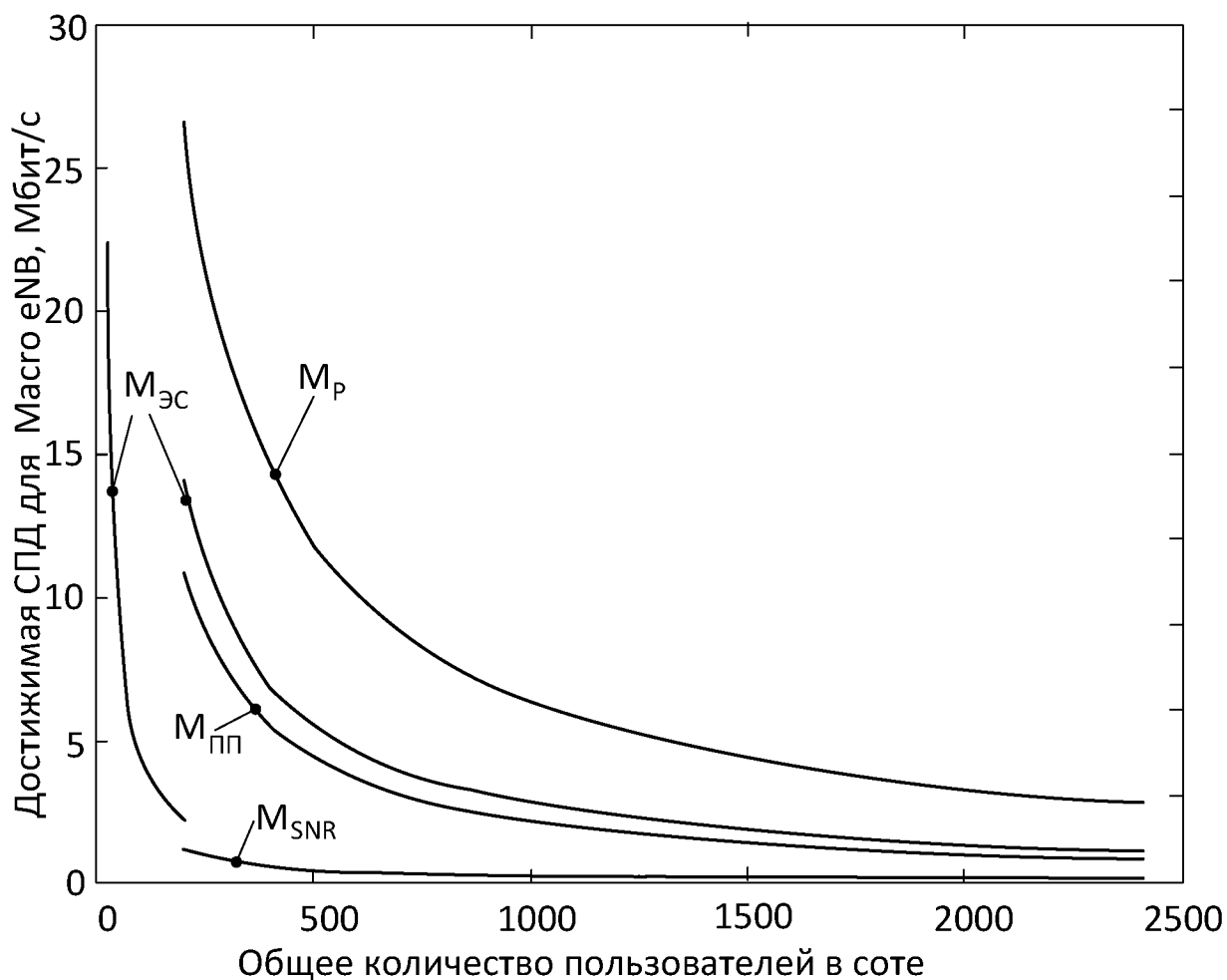


Рисунок 2.11 – Достижимая скорость передачи данных пользователей макро базовой станции

Хотя средняя достижимая скорость передачи данных для всех пользователей является самой высокой для критерия по SNR, большой процент пользователей, подключенных к макро базовой станции из-за нехватки доступной полосы пропускания является неудовлетворенным качеством обслуживания. С другой стороны, критерии по полосе пропускания и по энергосбережению приводят к снижению общей скорости передачи данных, но процент пользователей, удовлетворенных качеством обслуживания, много больше. Это связано с тем, что сотовая сеть более сбалансирована, а доступный ресурс делится более равномерно, чем, когда система использует критерий по SNR.

Таким образом, при развертывании гетерогенной сети для г. Донецка можно обеспечить большую возможность сокращения энергии в сети, одновременно улучшая качество обслуживания при использовании критериев выбора сот по полосе пропускания и по энергосбережению.

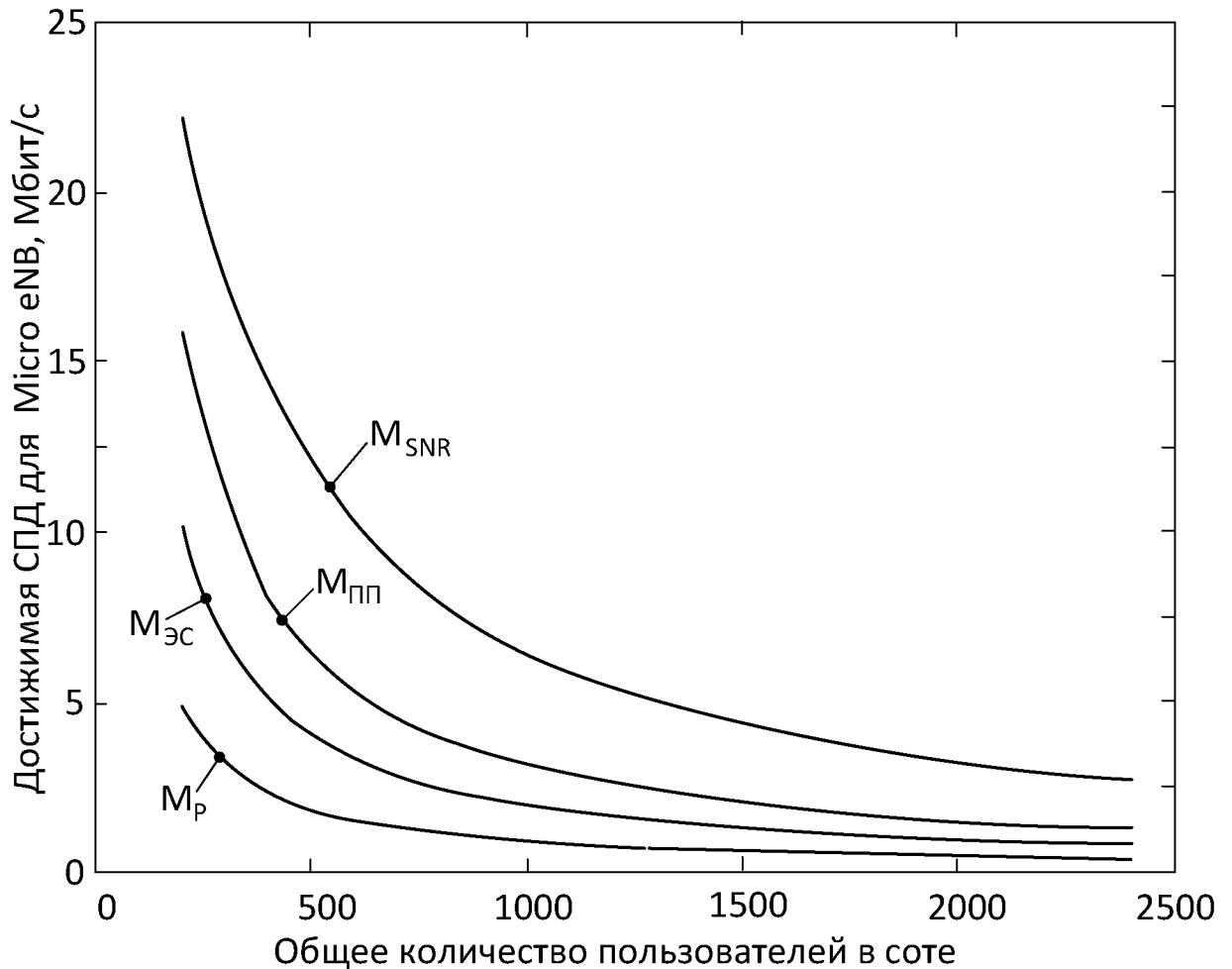


Рисунок 2.12 – Достижимая скорость передачи данных пользователей микро базовой станции

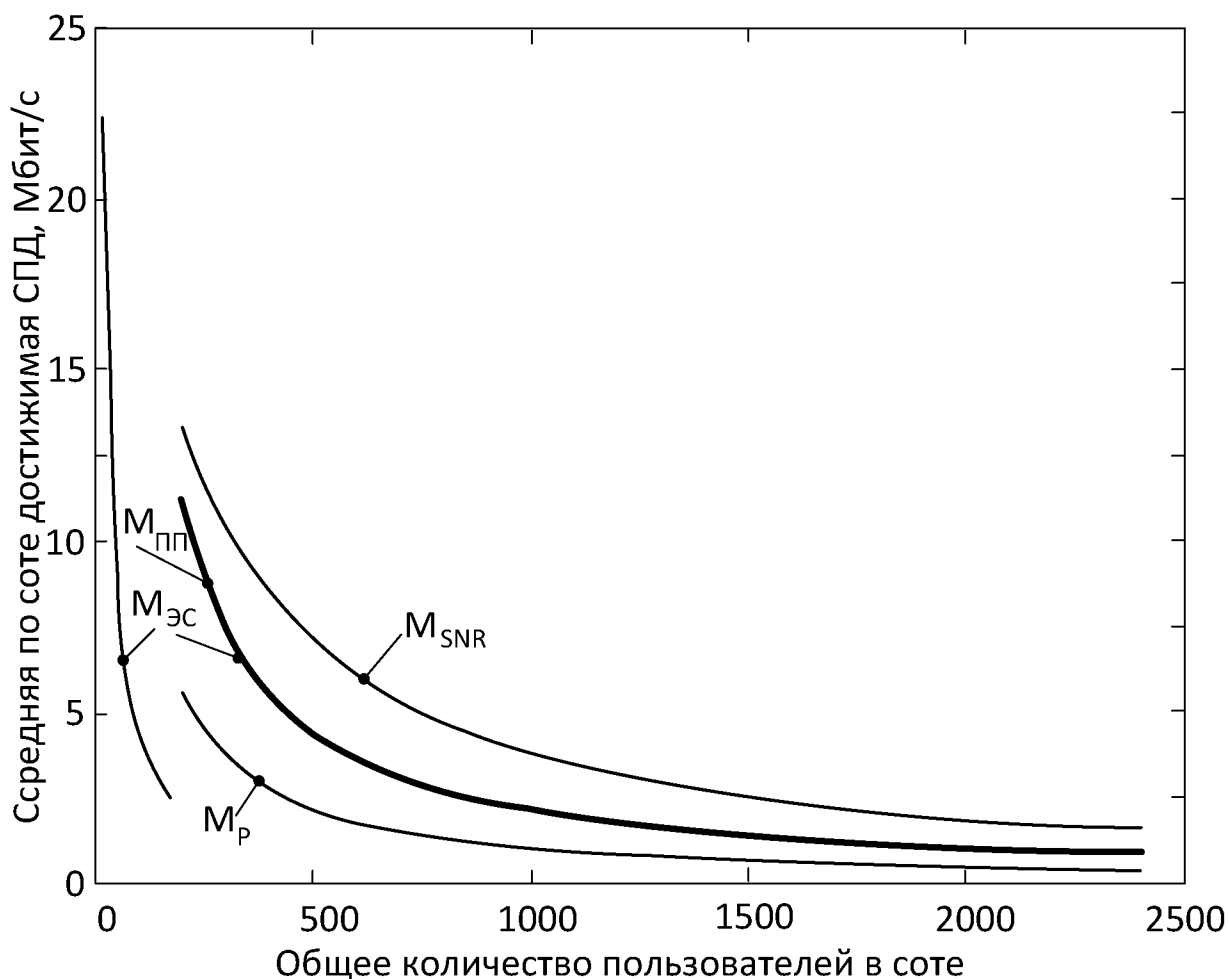


Рисунок 2.13 – Средняя достижимая скорость передачи данных для пользователей всей соты

Выводы по разделу 2

1. Проведено исследование критериев выбора сот для условий перспективной гетерогенной сети LTE типового крупного города, охватывающей район центральной части с одной макросотой и шестью микросотами.

2. Спрогнозированы плотность пользователей и генерируемый трафик. Рассмотрены четыре основных критерия выбора сот в гетерогенных сотовых сетях четвертого поколения LTE: по расстоянию; по уровню сигнал/шум; по полосе пропускания; по энергосбережению.

3. Для оценки эффективности критериев выбора сот проведено моделирование. Определены достоинства и недостатки критериев, оценена

возможность их использования для построения системы эффективного управления гетерогенной сетью LTE.

4. Критерии выбора сот на основе пропускной способности и на основе энергосбережения дают возможности снизить общее потребление энергии в сети, сбалансировать количество пользователей в микросотах и макросотах, управлять качеством услуг для абонентов в двухчастотной системе.

РАЗДЕЛ 3

ОПТИМИЗАЦИЯ СОКРАЩЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ LTE ДЛЯ УСЛОВИЙ КРУПНОГО ГОРОДА

3.1 Анализ стратегий управления ресурсами системы базовых станций

3.1.1 Категории пользователей и показатели качества канала в сетях LTE

Главным ограничивающим фактором при решении задачи снижения потребления электроэнергии сотовой сетью является необходимость поддерживать заданное качество обслуживания (QoS) абонентов. Качество обслуживания можно разделить на несколько уровней в зависимости от оператора и территории покрытия. В стандарте 3GPP LTE версии 13 [76] QoS разделен на 13 категорий, каждой из которых соответствует идентификатор класса QoS (QCI). Семь категорий QCI представляют услуги с наилучшим возможным качеством, а остальные 5 услуги с гарантированной скоростью передачи данных. Эти категории также можно разделить на видеоуслуги, услуги реального времени, услуги TCP и голосовые услуги. Рассмотрим пять категорий QoS, которые представляют различные услуги, наиболее востребованные у пользователей. Это FullHD видео (1080p), HD видео (720 p), SD видео (480 p), TCP и голосовые услуги. Они требуют скоростей передачи данных 10 Мб/с, 4-7 Мб/с, 500 кб/с – 3 Мб/с, 700 кб/с и 48 кб/с.

Кроме того, в стандарте LTE используется показатель индикатора качества канала (CQI). Он отражает дискретные уровни качества приема сигнала или соотношения сигнал/шум. Качество канала связи может быть описано уровнями соотношения сигнал/шум. Они определяются оператором, исходя из предоставляемых им услуг. Уровень CQI указывает на вид схемы модуляции и кодирования и размер транспортного блока для передачи данных пользователям. Зная значения показателей схемы модуляции и кодирования и размера транспортного блока можно оценить достижимую скорость передачи данных

пользователям, используя приведенную выше информацию и количество ресурсных блоков, выделяемых пользователю. Чтобы не учитывать сложную специфику сетевого MAC-уровня и процессы модуляции и кодирования на физическом уровне, применим используемую в стандарте LTE модифицированную формулу емкости Шеннона для оценки достижимой скорости передачи данных. Таким образом, чтобы оценить качества канала для определения необходимого количества спектральных ресурсов для пользователя, необходим лишь дискретные уровни CQI. Чтобы оценить и гарантировать минимальную допустимую скорость передачи данных для абонентских устройств, рассмотрим минимальный уровень соотношения сигнал/шум, соответствующий переданному от пользователя уровню CQI. Соответствие уровней CQI и минимально допустимого соотношения сигнал/шум приведено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Соответствие уровней CQI и соотношения сигнал/шум

Уровень CQI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Минимальный SNR, дБ	-7	-5,1	-3,1	-1,2	0,7	2,6	4,6	6,5	8,4	10,4	12,3	14,2	16,1	18,1	20

На основании уровней CQI пользователей можно определить минимальное количество спектрального ресурса, выделяемого пользователю для удовлетворения его запроса с учетом минимизации потребления электроэнергии. В стандарте LTE спектр распределен по времени и частоте. Для наименьшей единицы спектрального ресурса, которая называется ресурсным блоком, выделяется 0,5 мс времени и 180 кГц частоты. Считая, что мощность, необходимая базовой станции для передачи всех ресурсных блоках, постоянна, для экономии электроэнергии при обслуживании запросов пользователей базовая станция может либо выделять им меньшее количество ресурсных блоков, либо уменьшить полосу частот. Стандарт 3GPP LTE ограничивает доступную ширину полосы частот для базовых станций уровнями 1,4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц и 20 МГц. Чтобы уменьшить потребление электроэнергии базовая станция

может использовать прерывистую передачу (DTX) и адаптацию частотных полос [80], которые ограничат общее количество активных ресурсных блоков. Например, затраты электроэнергии при передаче сигнала снижаются до 60%, если базовая станция работает на полосе частот 15 МГц на протяжении 80% общего времени использования, поскольку функционирование на меньшей полосе частот в 15 МГц позволяет снизить энергопотребление до 75%. Такую же экономию электроэнергии дает работа на полной полосе частот 20 МГц на протяжении 60% общего времени использования. Таким образом, уменьшить энергопотребление можно, используя различные сочетания режимов работы базовых станций.

Оценка производительности сети на основании только общепринятых показателей может привести к некорректным выводам из анализа результатов оптимизации ее работы. Низкая производительность после применения методик энергосбережения не всегда отражает внутренние механизмы экономии электроэнергии. Например, в периоды низкой нагрузки, когда услуги запрашивает меньшее количество пользователей и они получают ожидаемое качество обслуживания, эффективность методов энергосбережения можно оценить как высокую. Однако значения общепринятых показателей могут говорить об обратном. Поэтому использование для оценки производительности сети таких величин, как различные характеристики QoS, вероятность покрытия и вероятность отказа канала не оправдано. Больше информации о результатах работы сети даст достижимая скорость передачи данных. Решение об оптимизации часто принимается исключительно на основе общепринятых показателей. Однако по изложенным выше причинам отказ от принятых строгих ограничений может создать дополнительные возможности для снижения потребления электроэнергии.

3.1.2 Анализ влияния распределения ресурсов для абонентов на потребление электроэнергии базовыми станциями

Согласно исследованиям [72] существует несколько способов управления ресурсами. Каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками и может быть использован в определенной соответствующей ситуации по выбору оператора. В стратегии управления ресурсами можно выделить три основные ситуации: управление в часы низкой нагрузки, управление в часы средней нагрузки и управление в часы высокой нагрузки. Различия между этими тремя ситуациями заключаются в размере полосы частот, необходимой для обслуживания пользователей с заданным качеством. В часы низкой нагрузки ресурсов сети достаточно, чтобы удовлетворить все запросы пользователей независимо от затребованного уровня услуг. В часы средней нагрузки ресурсов сети достаточно, чтобы удовлетворить часть запросов с заданным качеством обслуживания, но не все из них. В зависимости от того, какие абоненты подключаются к сети, качество их обслуживания может ухудшиться до более низкого уровня. В часы высокой нагрузки или при перегрузке сети оператор способен удовлетворить только отдельные запросы пользователей с заданным качеством обслуживания, но может гарантировать только минимальный уровень QoS или голосового вызова.

Чтобы использовать адаптивное управление ресурсами на различных уровнях QoS, необходимо рассмотреть основные принципы стратегии управления ресурсами. Для обслуживания пользователей с различным уровнем качества, разделим услуги на три группы: с гарантированной скоростью передачи данных, с негарантированной скоростью передачи данных и с наилучшим возможным качеством. Оператору нужно в первую очередь удовлетворить запросы абонентов, запрашивающих услуги с гарантированной скоростью передачи данных, а затем оставшиеся ресурсы направить на обслуживание пользователей, запрашивающих услуги с наилучшим возможным качеством. Чтобы обеспечить равноправное обслуживание пользователей, запрашивающих услуги с гарантированной скоростью передачи данных, базовая станция должна соотнести различные уровни QoS с показателями CQI абонентов. Затем базовая станция определяет количество ресурсов, необходимое для удовлетворения запроса каждого

пользователя. Исходя из того, что все абоненты в пределах соты будут пользоваться каналами с одинаковыми характеристиками соединения, большее количество ресурсов должны получить пользователи, запросившие услуги с более высокой гарантированной скоростью передачи данных. Например, пользователю, запросивший видео в формате FullHD (1080 p), которое требует скорости передачи данных 10 Мб/с, базовая станция должна выделить в два раза больше ресурсных блоков, чем пользователю, запросившему видео в формате HD (720 p) со скоростью передачи данных 5 Мб/с. Однако не всегда каналы передачи данных абонентов обладают одинаковыми характеристиками. На основе полученного от абонентских устройств показателя CQI базовая станция определяет характеристики канала. Среди абонентов, запросивших одинаковые услуги, больше ресурсов получают те, у которых показатель CQI имеет более низкое значение, чтобы компенсировать более низкие характеристики канала связи. Таким образом, пользователи, находящиеся у границ соты получают больше спектральных ресурсов, чем пользователи, расположенные в ее центре, если они запросят услуги с одинаковым уровнем QoS. Для сокращения потребления электроэнергии можно также установить верхний порог использования ресурсов для абонентов, запрашивающих услуги с наилучшим возможным качеством, в процентах от общих доступных ресурсов. Такой подход позволит базовой станции освободить часть ресурсов и получить возможность для экономии электроэнергии. А в периоды высокой нагрузки пользователи, запрашивающие услуги с наилучшим возможным качеством, смогут пользоваться только ресурсами, которые остаются свободными после удовлетворения запросов пользователей, запрашивающих услуги с гарантированной скоростью передачи данных. Например, если установить пороговое значение в 25%, то при в случае, когда абоненты, запрашивающие услуги с гарантированной скоростью передачи данных, будут использовать 60% спектральных ресурсов базовой станции, то абоненты, запрашивающие услуги с наилучшим возможным качеством, смогут пользоваться 25% ресурсов. Тогда базовая станция сможет экономить 15% электроэнергии при передаче на максимальной мощности. А если пользователи,

запрашивающие услуги с гарантированной скоростью передачи данных, будут использовать 80% спектральных ресурсов базовой станции, то пользователи, запрашивающие услуги с наилучшим возможным качеством, смогут пользоваться 20% ресурсов, а базовая станция будет работать на полную мощность.

В часы средней нагрузки, когда возрастает количество запросов пользователей, а доступные спектральные ресурсы могут удовлетворить только часть запросов в дополнение к уровням QoS следует применять принцип обслуживания запросов в порядке их поступления. Абоненты, запрашивающие услуги с наилучшим возможным качеством, которые подключаются к сети в этот период могут получить минимальную допустимую скорость передачи данных 50 кб/с, которой достаточно для осуществления голосовых вызовов. Эта скорость является нижним порогом ограничений по качеству услуг для всех пользователей сети. Когда абоненты, запрашивающие услуги с гарантированной скоростью, подключается к базовой станции, которая уже полностью использует свой спектральный ресурс, ресурсы, выделенные последнем подключившемуся абоненту, запросившему услуги с наилучшим возможным качеством, будут уменьшены до самого низкого уровня. Если затем последуют новые запросы, то все подключенные абоненты, запросившие услуги с наилучшим возможным качеством, получат минимально возможные ресурсы, а ресурсы, выделенные последнему подключившемуся абоненту, запросившему услуги с гарантированной скоростью, снизятся до более низкого уровня. Такая процедура позволит обслужить каждого подключенного пользователя в соответствии с его запросом и минимизирует вероятность отказа в доступе к сети. В часы высокой нагрузки доступных ресурсов недостаточно, чтобы обеспечить минимально допустимое качество обслуживания всем абонентам. В таком случае ресурсы будут выделять пользователям пропорционально их запросам, а уровень их CQI не будет учитываться, чтобы упростить вычисления для очень большого количества пользователей. Абонент, запрашивающий услуги с гарантированной скоростью, при запросе 10 Мб/с получит в два раза больше ресурсов, чем абонент

с запросом 5 Мб/с. Такой подход позволит удовлетворить определенную часть пользователей.

3.2 Модель снижения энергопотребления с пошаговым диммированием

Определение корректного критерия выбора сот в гетерогенной сотовой сети LTE на основании информации о запросах пользователей создает возможность для снижения потребления электроэнергии базовыми станциями. Взаимодействие между базовыми станциями с целью энергосбережения отражено в стандарте технической спецификации TS 35.521, разработанной организацией 3GPP. В неё входят управление телекоммуникациями, самоорганизующиеся сети (SON) и модель политики ресурсов сети. Стандарт дополняет систему автоматическим управлением сетью и интеллектуальными механизмами. Его цель заключается в увеличении производительности сети и повышении гибкости сотовой системы за счет оптимизации и реконфигурации происходящих в ней процессов. Концепция самоорганизующихся сетей позволяет базовым станциям изменять конфигурацию в зависимости от ситуации без вмешательства человека. Таким образом, создается возможность для выполнения большего количества операций, в частности, для перехода в режим ожидания. В концепции самоорганизующихся сетей суть режима ожидания заключается в том, что базовые станции могут взаимодействовать с целью экономии электроэнергии путем перераспределения трафика и передачи информации о нем между собой.

Макро базовые станции необходимы для работы круглосуточно, чтобы обеспечить полное покрытие, не учитывая количество пользователей. Сократить энергопотребление можно отключением микро базовых станция, когда в сети мало пользователей. Однако, сеть может сэкономить больше энергии, если поддерживать макро базовую станцию для работы на низком уровне мощности с учетом удовлетворения потребностей пользователей.

Рассмотрим влияние макро базовой станции с пошаговым диммированием, то есть изменением мощности радиоизлучения, в сочетании с критериями выбора

сот на возможности энергосбережения в гетерогенной сотовой сети LTE. Пошаговое диммирование может снижать энергопотребление, поскольку снижается мощность передачи макро базовой станции в соответствии с количеством подключаемых пользователей.

Большая часть потребления энергии в гетерогенной сотовой сети LTE приходится на макро базовые станции, которые операторы развертывают для обеспечения широкого покрытия. В макро базовых станциях доступная пропускная способность для каждого пользователя увеличивается при уменьшении количества подключенных пользователей. Увеличение доступной полосы пропускания для каждого пользователя позволяет работать с более низким соотношением сигнал/шум SNR для достижения такого же уровня скорости передачи данных. Чем выше значение SNR, тем лучше качество сигнала. При значениях SNR ниже 0 скорость подключения будет очень низкой, так как это означает, что в принимаемом сигнале шума больше, чем полезной части, при этом также существует вероятность потери LTE-соединения. Следовательно, макро базовая станция может передавать сигнал на меньшей мощности при поддержке требуемого качества обслуживания.

Рассмотрим потребляемую каждой базовой станцией энергию в момент времени t . Обозначим через N_t^{abmic} и N_t^{abmac} количество подключенных пользователей соответственно к микро базовым станциям и макро базовой станции, являющиеся результатом выбора соты по одному из критериев. Рассмотрим число пользователей как нагрузку базовой станции. Предположим, что микро базовые станции потребляют небольшую мощность и могут быть включены или выключены, $b_t \in \{0,1\}$. Таким образом, если $N_t^{abmic} > 0$ и $b_t = 1$, микро базовая станция постоянно потребляет мощность P^{micro} для приема/передачи. Также вспомогательное оборудование микро базовой станции потребляет дополнительную мощность как процент от P^{micro} для поддержки оборудования независимо от уровня спроса.

В результате, общая потребляемая мощность всеми микро базовыми станциями составит:

$$E_{bs} = \sum_{j=1}^{N_{micro}} b_j \cdot (1 + S_{addb}) \cdot P^{micro} \quad (3.1)$$

где S_{addb} – процент дополнительной мощности для вспомогательного оборудования микро базовой станции

Макро базовые станции требуют энергии для передачи/приема сигнала, для вспомогательного оборудования и для вентиляции и охлаждения [19]. Оператор может определить изменение мощности передачи в зависимости от текущего трафика.

Предположим, что макро базовая станция имеет следующий набор возможных уровней мощности передачи:

$$P^{macro} = [30, 31, 32, \dots, \max P^{macro}], \text{ dBm} \quad (3.2)$$

Благодаря увеличенной доступной пропускной способности для пользователей в периоды низкой нагрузки, мощность передачи макро базовой станции можно снизить, при этом для пользователей достигается требуемая скорости передачи данных. Базовая скорость передачи данных задается оператором сотовой связи. Для определения текущего состояния макро базовой станции в момент времени t создается вектор p_t , содержащий значения долей от максимальной мощности, потребляемой каждой макро базовой станцией в момент времени t при определенном уровне диммирования.

Таким образом, мощность макро базовой станции, требуемая для передачи в момент времени t , равна $p_t \cdot P^{macro}$. Кроме того, для вспомогательного оборудования и системы вентиляции и кондиционирования зададим энергопотребление как процент от максимальной мощности передачи P^{macro} . Вспомогательное оборудование потребляет энергию только тогда, когда макро

базовые станции передают сигнал, $a_t = 1$, в то время как кондиционирование воздуха необходимо в любое время. Несмотря на то, что вспомогательное оборудование и кондиционирование потребляют различную мощность, изменяющаяся часть является несущественной. Предположим, что переменная часть включена в потребление мощности передачи.

Учитывая вышеприведенные определения, необходимо минимизировать общее потребление энергии $\sum_{t=1}^T E_t$ путем отключения микро базовых станций, когда нет пользователей ($N_t^{abmic} = 0$), и оптимизировать мощность передачи макро базовой станции в соответствии с текущим числом пользователей макро базовой станции (N_t^{abmac}). Задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$Z = \min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N^{micro}} b_t^j \cdot (1 + S_{addb}) \cdot P^{micro} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N^{macro}} a_t^i \cdot [P^{macro}] \cdot [P_t^i]^T + \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N^{macro}} a_t^i \cdot S_{adda} \cdot P^{micro} + T \cdot N_{macro} \cdot S_{per} \cdot P^{macro} \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

где S_{adda} – процент дополнительной мощности для вспомогательного оборудования макро базовой станции;

S_{per} – доля потребления энергии дополнительной вентиляцией и системой кондиционирования воздуха.

Ограничения:

$$N_t^{abmic} \cdot b_t \geq N_t^{abmic} \quad (3.4)$$

$$N_t^{abmac} \cdot a_t \geq N_t^{abmac} \quad (3.5)$$

$$BaseC \geq ExpC \quad (3.6)$$

$$a_t, b_t \in \{0,1\} \quad (3.7)$$

Целью модели является минимизация общего энергопотребления сети в течение периода времени T . Уравнение (3.3) включает энергопотребление: микро

базовых станций, передачи/приема макро базовой станции, вспомогательного оборудования макро базовой станции и системы вентиляции и охлаждения макро базовой станции. Ограничения (3.4) и (3.5) гарантируют, что базовая станция включаются при подключении пользователей. Ограничение (6) гарантирует, что достигаемая скорость передачи данных $ExpC$ будет не менее требуемой $BaseC$.

Достигаемая скорость передачи для каждого пользователя определяется по формуле:

$$ExpC = 0.75 \cdot ExpB \cdot \log\left(1 + \frac{SNR}{1.25}\right) \quad (3.8)$$

где $ExpB$ – полоса пропускания, выделяемая каждому пользователю, зависит от $N_t^{abmacro}$;

SNR – отношение сигнал/шум.

Уровень сигнала определяется по модели Окамура-Хата для городов и значению P^{macro} .

Для решения поставленной задачи оптимизации необходимо выбрать аналитический метод системного анализа, который приводил бы к конечным результатам с наименьшими затратами на вычисления или же давал возможность получить наибольший объем информации об искомом решении. В настоящее время применяют в основном следующие методы:

- исследования функций классического анализа;
- вариационное исчисление;
- динамическое программирование;
- основанные на неопределенных множителях Лагранжа;
- линейное программирование;
- принцип максимума;
- нелинейное программирование.

Для решения схожих задач системного анализа используют эффективный алгоритм – симплексный метод, позволяющий за конечное число итераций находить оптимальное решение подавляющего большинства задач. Тип

используемых ограничений (равенства или неравенства) не сказывается на возможности применения указанного алгоритма. Дополнительной проверки на оптимальность для получаемых решений не требуется.

Для исследования полученную модель оптимизации энергопотребления, проведено имитационное моделирование участка гетерогенной сети LTE для центральной части г. Донецка. Ее карта представлена на рисунке 3.1.

Макро базовая станция работает на частоте 1800 МГц и способна передавать сигнал максимум в 46 дБм. Мощность передачи макро базовой станции может варьироваться в зависимости от нагрузки $N^{ab_{mac}}$:

$$P^{macro} = [37, 38, 39, \dots, 46] \text{dBm} \quad (3.9)$$

Микро базовые станции работают на частотной полосе 2600 МГц и передают сигнал 30 дБм, когда они активны. Изменение количества активных пользователей в зоне можно смоделировать, используя представленный на рисунке 3.2 профиль трафика. Профиль содержит изменение спроса на трафик в течение суток.



Рисунок 3.1 – Карта части г. Донецка с предполагаемым местом развертывания гетерогенной сети

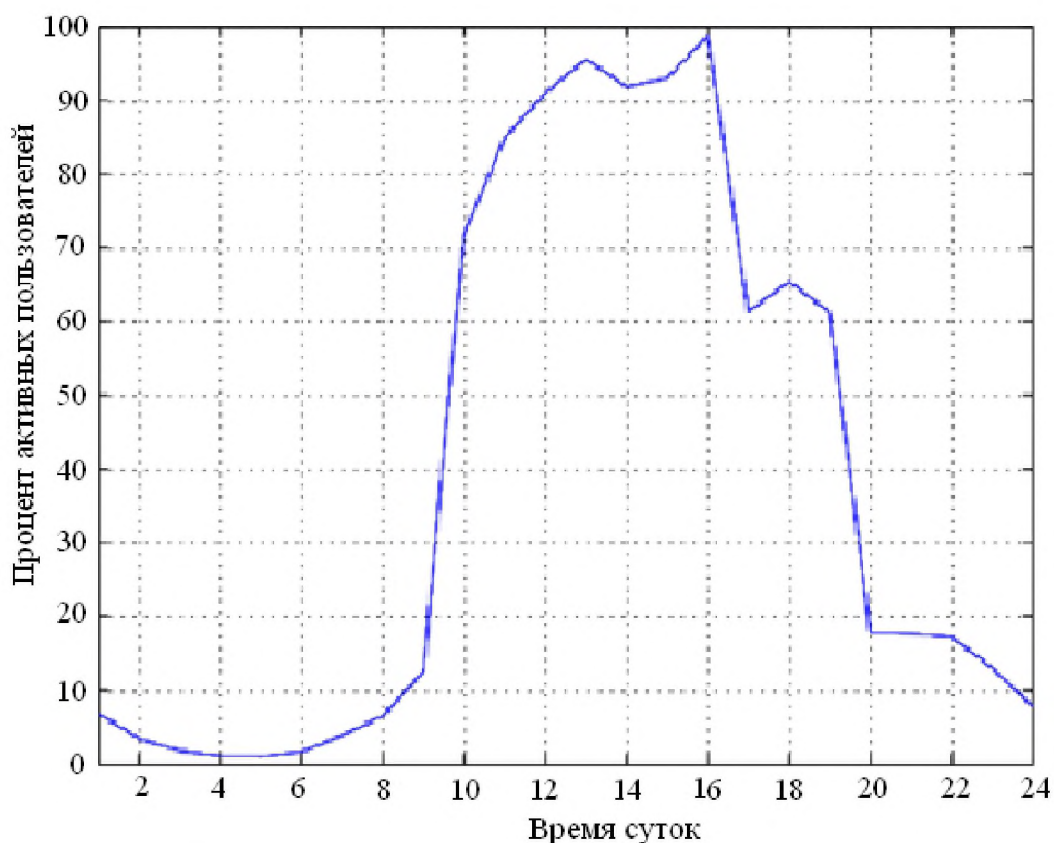


Рисунок 3.2 – Нормализованное изменение количества активных пользователей в макросоте в течение суток

Для рассматриваемой гетерогенной сотовой сети г. Донецка предположим, что максимальное количество активных пользователей макросоты составляет 2168 человек с равномерным их распределением, а каждое место с высокой плотностью (микросоты) при этом увеличивает их на 10% от общего числа пользователей.

Моделирование проводится для четырех основных критериев выбора сот в гетерогенных сотовых сетях четвертого поколения LTE: по расстоянию; по уровню сигнал/шум; по полосе пропускания; по энергосбережению.

Для измерения производительности фокусируемся на фактическом объеме потребления энергии и измеряем улучшение в процентах от требуемой энергии после оптимизации.

Рассматривая эффективность оптимизации потребления энергии, анализ обычно основывается на общих показателях, таких как достижимая скорость

передачи данных пользователей, вероятность покрытия и эффективность использования энергии. Однако на практике существует больше переменных и ограничений, которые существенно влияют на измерение и оценку. Например, оператор сотовой связи может сделать вывод, что повышенная скорость передачи данных, более высокая вероятность покрытия или большее количество данных, передаваемых на единицу энергии, приводят к повышению производительности сети.

При моделировании, с одной стороны, не ограничивается максимальная скорость передачи данных пользователями, которые получают высокий уровень SNR. С другой стороны, допускается снижение скорости передачи данных, вызванное неблагоприятным эффектом ухудшения качества сигнала в качестве компромисса с более низким потреблением энергии. В качестве минимального требования рассматривается только скорость передачи данных в 500 кбит / с.

На рисунках 3.3–3.6 представлены графики, отражающие результаты моделирования в каждом часовом промежутке в течение суток. Анализ включает, во-первых, оценку влияния изменения нагрузки (количества активных абонентов) на энергопотребление системы в соответствии с предложенным алгоритмом сокращения энергопотребления. На рисунке 3.2 приведен график изменения потребления энергии микро базовой станцией в процентах от полной потребляемой энергии микро базовой станцией при использовании различных критериев выбора сот. Рисунок 3.3 демонстрирует, что разница в потреблении энергии при использовании критерия выбора сот по энергосбережению по сравнению с другими критериями очевидна в периоды низкой нагрузки, так как в эти периоды микро базовые станции отключаются.

На рисунке 3.4 приведен график изменения потребления энергии макро базовой станцией в процентах от полной потребляемой энергии макро базовой станцией при использовании различных критериев выбора сот.

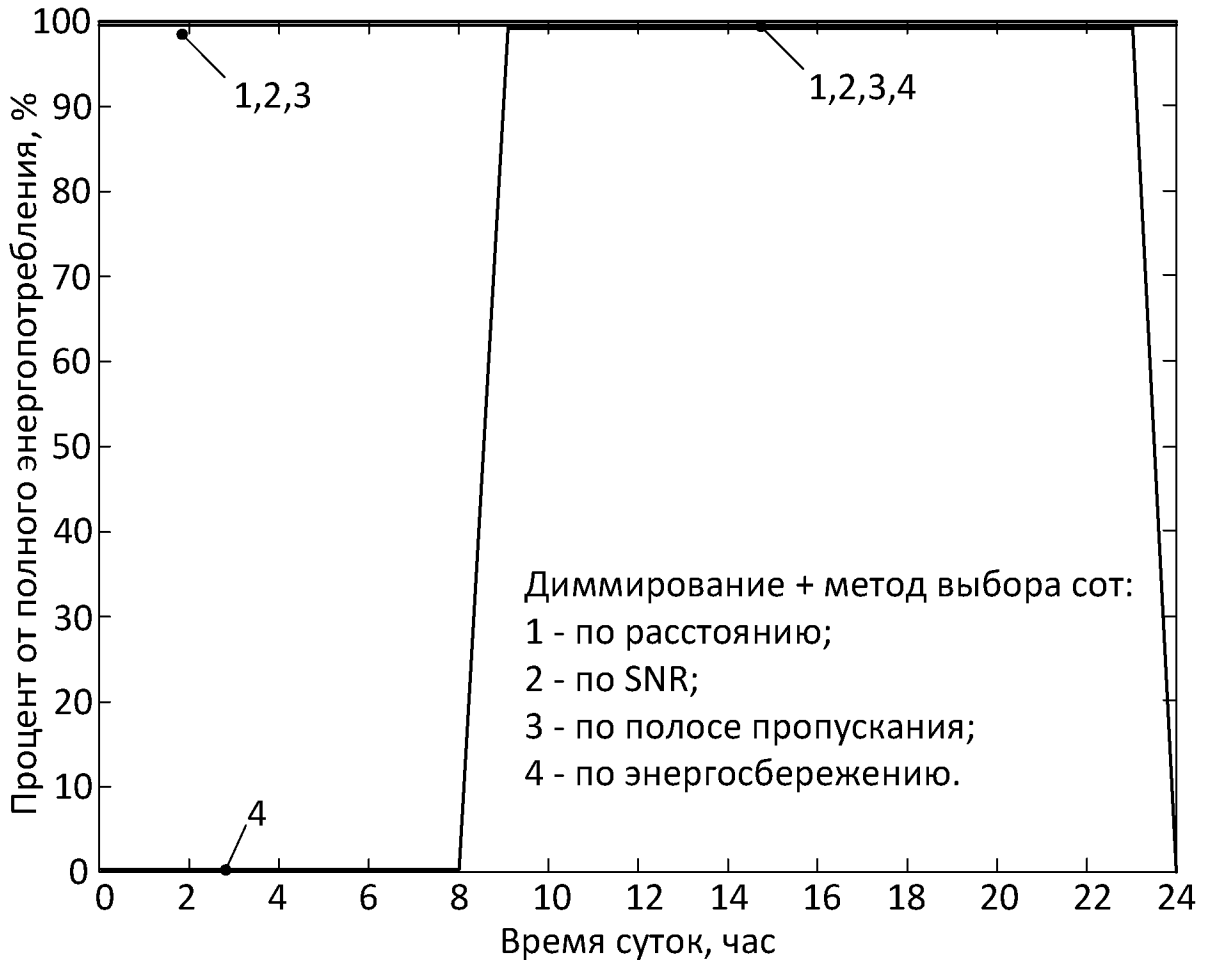


Рисунок 3.3 – Потребление энергии микро базовой станцией в процентах от полной потребляемой энергии микро базовой станцией при использовании различных критериев выбора сот

Рисунок 3.4 демонстрирует, что в часы средней и высокой нагрузки наименьшим энергопотреблением характеризуются критерии выбора сот по полосе пропускания и по энергосбережению. Критерии выбора сот по расстоянию и по соотношению сигнал/шум (SNR) менее экономичны, что связано с большим количеством пользователей, подключающихся к макро базовой станции.

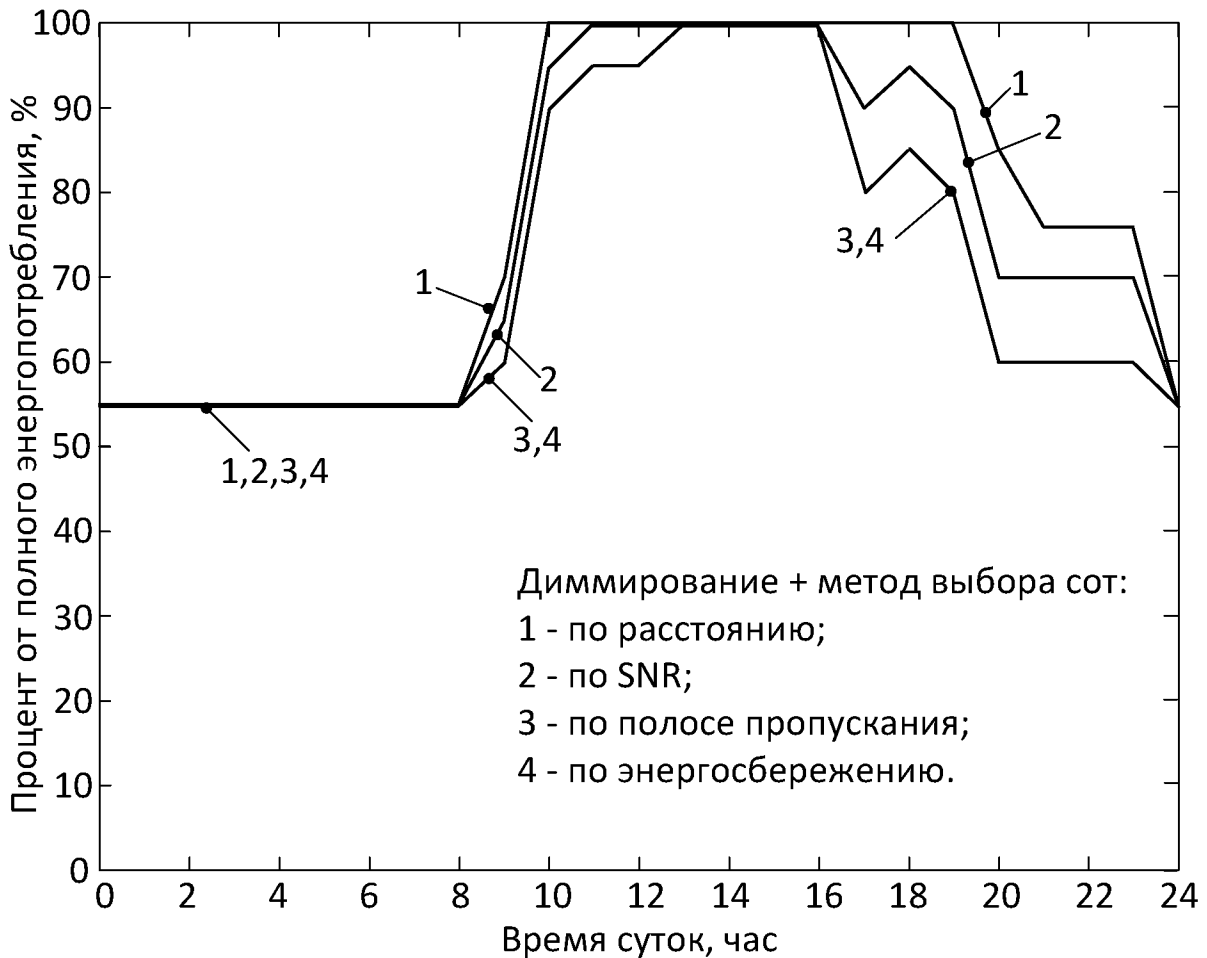


Рисунок 3.4 – Потребление энергии макро базовой станцией в процентах от полной потребляемой энергии макро базовой станцией при использовании различных критериев выбора сот

Рисунок 3.5 отражает общее потребление энергии в процентах от полной потребляемой энергии при использовании различных критериев выбора сот. Здесь также видно, что наилучшим способом энергопотребления для рассматриваемых условий является предложенный метод энергосбережения с диммированием мощности макро базовой станции.

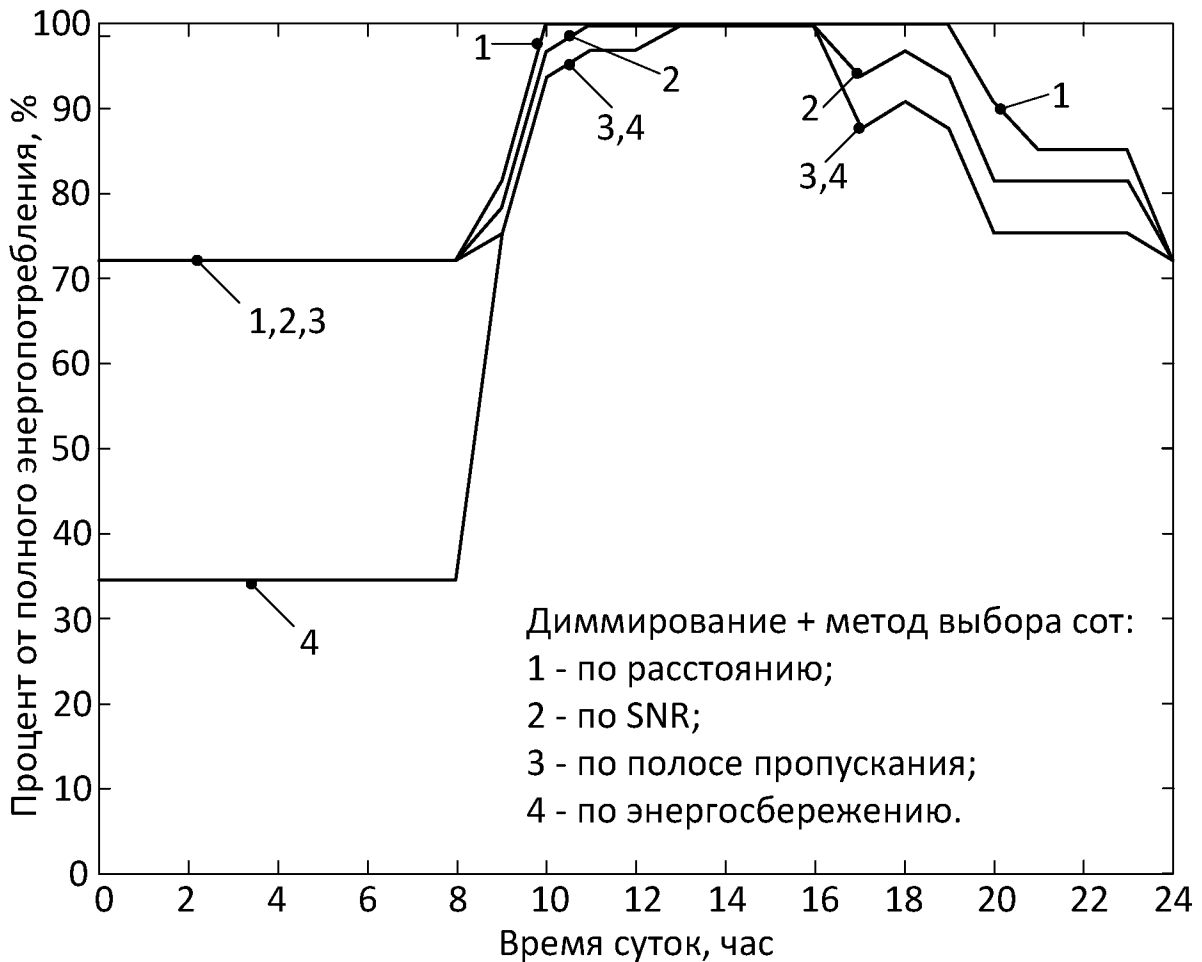


Рисунок 3.5 – Общее потребление энергии в процентах от полной потребляемой энергии при использовании различных критериев выбора сот

На рисунке 3.6 представлены графики изменения достижимой скорости передачи данных для пользователей макро базовой станции. Минимизированная мощность передачи макро базовой станции влияет только на пользователей, подключенных к ней. При использовании различных критериев выбора сот уменьшение энергопотребления снижает скорость передачи данных пользователей. В периоды с низкой нагрузки это особенно заметно, поскольку оборудование работает на минимуме мощности. Однако, скорость передачи данных в эти периоды все равно остается высокой, поскольку количество активных пользователей невелико. В периоды средней и высокой нагрузки наилучшие показатели дает критерий выбора сот по SNR. Однако данные

показатели являются средними, а из-за неравномерности использования ресурса часть пользователей получает низкую скорость передачи данных.

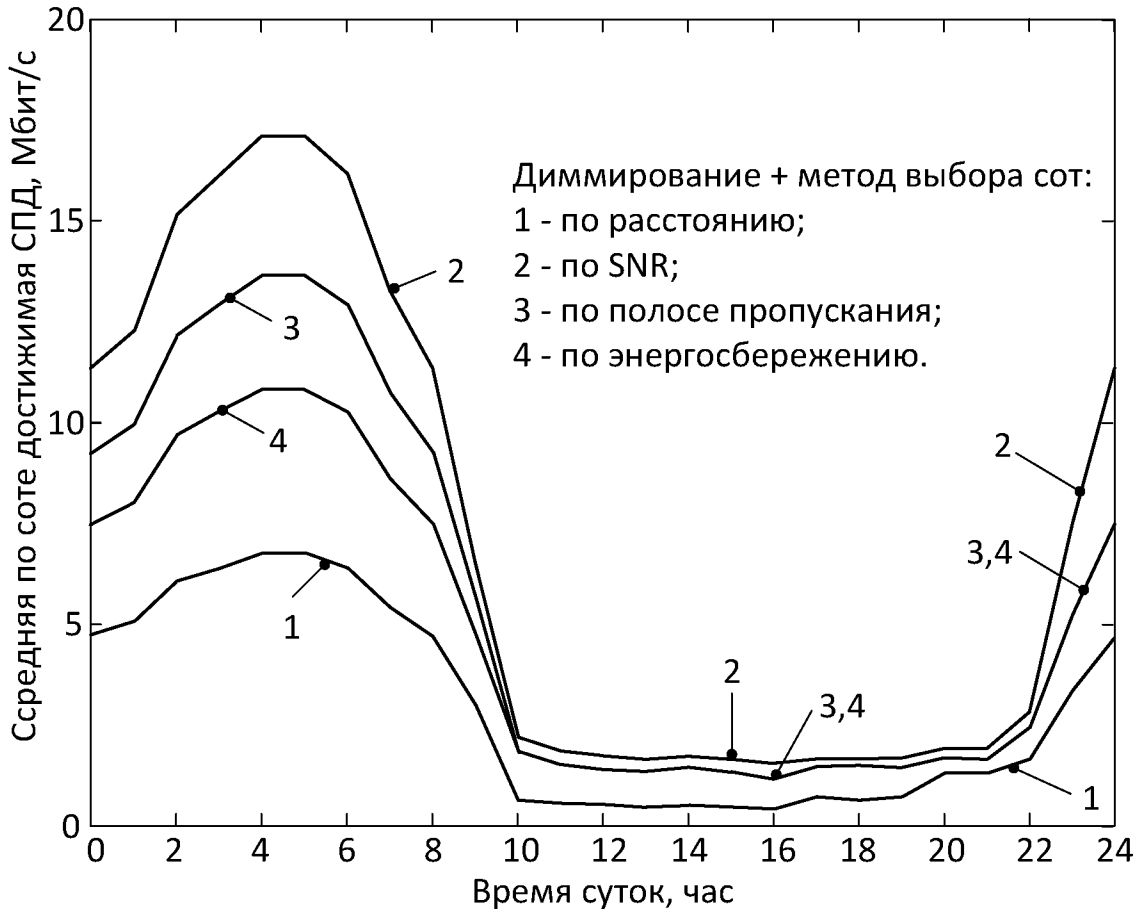


Рисунок 3.6 – Достижимая скорость передачи данных пользователями макро базовой станции при использовании различных критериев выбора сот в сочетании с диммированием мощности макро базовой станции

Численные результаты моделирования приведены в таблице 3.2. В таблице показано процентное соотношение энергопотребления после применения алгоритмов сокращения потребления энергии от полного потребления энергии при отсутствии энергосбережения. Представлен процент потребления энергии отдельно в макросотах, отдельно в микросотах и общий процент от полного энергопотребления (без экономии).

Согласно таблице 3.2, можно значительно снизить общее потребление энергии с помощью предлагаемого алгоритма оптимизации энергопотребления на основе пошагового диммирования в сочетании с критерием выбора сот по

энергопотреблению. Требуется около 69 % от полной потребности в энергии сотовой сети без экономии. Применение метода пошагового диммирования в сочетании с другими критериями выбора сот также дает возможность снизить потребление энергии. В частности, критерий выбора сот по расстоянию в сочетании с пошаговым диммированием дает 86,4% от полной потребности в энергии, критерий выбора сот по соотношению сигнал/шум – 84,6% и критерий по полосе пропускания – 82,3.

Таблица 3.2 – Модельное потребление энергии в процентах от полной потребляемой энергии

Энергопотребление в % от полного энергопотребления	По расстоянию с диммированием	По SNR с диммированием	По полосе пропускания с диммированием	По энергосбережению с диммированием
Общее	86,4	84,6	82,3	69,2
в микро базовых станциях	100	100	100	65
в макро базовых станциях	78,3	75,4	71,7	71,7

Выводы по разделу 3

1. Рассмотрена модель снижения энергопотребления в гетерогенной сотовой сети LTE с пошаговым диммированием базовых станций макросот.

2. Проанализировано влияние макро базовых станций с пошаговым диммированием, то есть изменением мощности радиоизлучения, в сочетании с критериями выбора сот, на возможности энергосбережения в гетерогенной сотовой сети LTE.

3. Составлен критерий минимизации общего потребления энергии путем отключения микро базовых станций, когда нет пользователей, и оптимизации мощности передачи макро базовых станций в соответствии с текущим числом пользователей макро базовых станций.

4. Проведено моделирование предложенного алгоритма снижения энергопотребления для участка гетерогенной сети LTE центральной части г. Донецка.

5. Представлены графики, отражающие результаты моделирования в каждом часовом промежутке в течение суток.

6. Проведен анализ результатов моделирования, доказывающий эффективность предложенного алгоритма минимизации энергопотребления гетерогенной сотовой сетью LTE.

РАЗДЕЛ 4

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ LTE
С УЧЕТОМ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

4.1 Анализ методик планирования гетерогенных сетей

В известных методиках планирования гетерогенных сотовых сетей LTE уделяется мало внимания вопросу потребления электроэнергии. Одной из важных причин этого является то, что включения фактора энергопотребления в задачу планирования сети делает оптимизацию её структуры значительно более сложной. А при планировании сети в масштабах крупного города решение такой задачи становится ещё более трудным. Другой проблемой учета энергопотребления при планировании сети становится анализ запросов пользователей. В большинстве работ, посвященных этому аспекту, исходят из предположения, что запросы распределяются по территории покрытия сети равномерно. Однако на больших площадях с высокой вероятностью количество запросов пользователей будет существенно отличаться в зависимости от территориального расположения и времени суток. Учет этого фактора поспособствует более точному решению задачи планирования сети. Кроме того, существующие сотовые сети в последнее время демонстрируют тенденцию к медленному расширению. Показатели покрытия территории городов сотовыми сетями говорят о том, что случаи, когда операторы станут разворачивать совершенно новые сети будут относительно редкими. Тем не менее, возможно оценить методику планирования гетерогенной сотовой сети для района типового крупного города с учетом оптимизации потребления электроэнергии на основе минимизации капитальных затрат на её создание.

Для применения такой методики подходит существующая сеть, состоящая только из макро базовых станций, которую необходимо дополнить микро базовыми станциями для обслуживания возрастающего количества запросов пользователей. Ключевыми аспектами такой задачи являются планирование

основной сети макро базовых станций с минимальными капитальными затратами, ориентированное на обеспечение полного покрытия территории и планирование дополнительной сети микро базовых станций, чтобы обслуживать запросы абонентов в точках повышенного спроса. Такие точки отражают повышенный уровень запросов пользователей, который требует увеличения емкости сети в определенных зонах. Такими зонами являются территории с небольшой площадью, на которых одновременно собирается большое количество абонентов, активно пользующихся мобильными устройствами. В известных исследованиях [75] предлагаются методы планирования сети, основанные на равномерном распределении точек высокого спроса. Также ученые [61] рассматривают одновременно вопросы полного покрытия и обеспечения заданного качества услуг. Но авторы подчеркивают, что при этом производительность сети и качество предоставляемых услуг не отражаются на результатах планирования. Даже в случаях, когда при оптимизации структуры сети учитывается изменения уровня спроса пользователей в течение суток для определения требований к мощности работы оборудования, не уделяется внимание тому, как территориально распределяются запросы абонентов. Поэтому предложенные способы не дают значительной экономии капитальных затрат при планировании сети.

Рассматривая масштабы рассматриваемой задачи и дефицит вычислительных ресурсов, для её решения следует применять двухшаговый подход. Помимо капитальных затрат он учитывает при планировании сети потребление электроэнергии в соответствии с запросами пользователей и её производительность. В предложенных ранее методиках для снижения энергопотребления применялось только отключение базовых станций. Однако результаты, полученные в главе 3, показывают, что используя пошаговое диммирование макро базовых станций в сочетании с актуальным критерием выбора сот абонентским оборудованием, можно достичь лучших результатов. В этом случае количество сэкономленной электроэнергии существенно больше, чем при использовании только отключения базовых станций. Таким образом, имеет

смысл рассматривать отдельно задачу минимизации капитальных затрат на планировании сети и задачу минимизации операционных затрат на её функционирование с учетом снижения потребления электроэнергии. Также необходимо принимать во внимание стоимость оборудования базовых станций, его установки, оборудования транспортной сети и радиооборудования, а также тот, что расходы будут зависеть от места расположения базовой станции.

В известных исследованиях не изучалось влияние предварительного планирования сети на операционные расходы. Это особенно важно для сети в условиях крупного города с высокой плотностью населения, где всегда присутствуют запросы услуг пользователями. Это приводит к тому, что из-за высокого уровня спроса базовые станции должны быть включены постоянно. А в периоды пиковой нагрузки доступная полоса частот базовых станций не может полностью удовлетворить все запросы абонентов. Из этого следуют два вывода. Во-первых, снижение потребления электроэнергии за счет выключения базовых станций с большой вероятностью невозможно в часы высокой нагрузки в районах с высокой плотностью населения. Поэтому необходимо изучить, какие результаты дают предложенные критерии выбора сот и способы энергосбережения. Во-вторых, не учитываются сельские районы, где уровень запросов пользователей минимальный.

4.2 Критерий оптимизации расположения базовых станций в гетерогенной сети сотовой связи LTE с учетом минимизации капитальных затрат и качества обслуживания

Объектом развертывания сети выступает городская территория, состоящая из зон обслуживания различного типа, включающих жилые кварталы, дороги, торговые и развлекательные центры и прочее. Каждая зона обслуживания обладает уникальными требованиями к трафику.

Рассмотрим район площадью A км² с количеством тестовых точек tt , где $tt \in [1, N^{tt}]$. Тестовые точки необходимы для гарантированного покрытия

территории, но не отражают требования к трафику. Пусть в районе расположены mbs потенциальных макро базовых станций, где $mbs \in [1, N^{mbs}]$ и ts точек потенциального скопления абонентов, где $ts \in [1, N^{ts}]$. Количество макро базовых станций ограничивает возможные места их развертывания. Эти ограничения близки к реальным, учитывающим такие факторы, как особенности рельефа, доступность инфраструктуры, окружающие препятствия и сложности с приобретением объектов для расположения оборудования, которые ограничивают свободу развертывания макро базовых станций. Пусть $k1^{mbs} = 1$, если макро базовая станция развернута в потенциальном месте расположения mbs . Точки потенциального скопления абонентов представляют собой небольшую территорию, где могут собираться абоненты. В отличие от макро базовых станций для микро базовых станций не существует ограничений по месту развертывания. Поэтому исходим из того, что можно установить микро базовую станцию в любой тестовой точке. Пусть $k2^{tt} = 1$, если микро базовая станция развернута в тестовой точке tt . При этом, поскольку макро базовая станция должна обеспечивать полное покрытие соты независимо от состояния микро базовых станций, каждая тестовая точка должна находиться в зоне покрытия как минимум одной макро базовой станции. Пусть $k3^{tt,mbs} = 1$, если тестовая точка tt находится в зоне покрытия макро базовой станции mbs и $k3^{tt,mbs} = 0$ в противном случае. Кроме того, точка потенциального скопления абонентов ts должна находиться в зоне покрытия как минимум одной микро базовой станции. Пусть $k4^{ts,tt} = 1$, если точка потенциального скопления абонентов ts находится в зоне покрытия микро базовой станции из тестовой точки tt и $k4^{ts,tt} = 0$ в противном случае. Чтобы учесть зависимость между местоположениями точки потенциального скопления абонентов и микро базовой станции, в выражение включено предполагаемое расстояние между ними $L2^{ts,tt}$. Стоимость развертывания сети включает стоимость базовой станции, состоящую из оборудования базовой станции, радиооборудования, стоимость монтажа и установки. Пусть она равна C^{mac} для

макро базовой станции и C^{mic} для микро базовой станции. Пусть стоимость транспортной сети между макро и микро базовыми станциями равна $c1$, штрафная стоимость микро базовых станций, удаленных от точек скопления абонентов равна $c2$. Тогда для создания гетерогенной сотовой сети с минимальными капитальными затратами необходимо найти:

$$Z = \min \left\{ \begin{aligned} & \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} C^{mac} k1^{mbs} + \sum_{tt=1}^{N^{tt}} C^{mic} k2^{tt} + \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c1 L1^{mbs,tt} k1^{mbs} k2^{tt} + \\ & + \sum_{ts=1}^{N^{ts}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c2 L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где

$$\sum_{tb=1}^{N^{tt}} k3^{tt,mbs} k1^{mbs} \geq 1 \quad (4.2)$$

$$\sum_{ts=1}^{N^{ts}} k4^{ts,tt} k2^{tt} \geq 1 \quad (4.3)$$

$$L1^{tt,mbs} k3^{tt,mbs} k1^{mbs} \leq R^{mac} \quad (4.4)$$

$$L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt} \leq R^{mic} \quad (4.5)$$

$$k1^{mbs} \in \{0,1\} \quad (4.6)$$

$$k2^{tt} \in \{0,1\} \quad (4.7)$$

$$k3^{tt,mbs} \in \{0,1\} \quad (4.8)$$

$$k4^{ts,tt} \in \{0,1\} \quad (4.9)$$

Выражение (4.1) состоит из двух частей. Первые два слагаемых минимизируют стоимость развертывания базовых станций, оперируя их количеством. Два следующих слагаемых предназначены для оптимизации местонахождения микро базовых станций. Общие затраты на организацию транспортной сети между макро и макро базовыми станциями $c1$ зависят от расстояния между макро базовыми станциями и макро базовой станцией, к которой они подключены. $L1^{tt,mbs}$ определяет расстояние между потенциальным местоположением макро базовой станции mbs и тестовой точкой tt . Для выбора

места развертывания микро базовой станции необходимо учитывать расстояние $L2^{ts,tt}$ между потенциальным местоположением микро базовой станции в тестовой точке tt и соответствующей ей точкой потенциального скопления абонентов ts , чтобы обеспечить требуемый уровень обслуживания абонентов, находящихся в зоне покрытия микро базовой станции. $c2$ является коэффициентом, указывающим на случаи, когда микро базовая станция расположена на большом расстоянии от точки потенциального скопления абонентов. Условие (4.2) обеспечивает наличие как минимум одной макро базовой станции, покрывающей каждую тестовую точку, поскольку макро базовые станции должны гарантировать полное покрытие соты в любое время. Условие (4.3) гарантирует, что микро базовые станции покрывают все точки потенциального скопления абонентов. Условия (4.4) и (4.5) указывают на то, что тестовые точки tt и точки потенциального скопления абонентов ts должны находиться в зоне покрытия соответствующих макро и микро базовых станций. Условия (4.6-4.9) указывают на то, что данные переменные являются двоичными.

Поскольку необходимо составить план расположения базовых станций гетерогенной сети сотовой связи в масштабах города, количество переменных будет значительным. Решить такую задачу будет сложно. Поэтому разделим ее на две части: планирование сети, основанное на обеспечении покрытия, и планирование сети, основанное на качестве обслуживания [20]. Первая часть включает обеспечение полного покрытия соты. Во второй части также рассматриваются требования к качеству обслуживания в точках потенциального скопления абонентов. Это позволяет отразить возростание требований к качеству обслуживания в отдельных точках, которое требует дополнительных ресурсов сети, чтобы обеспечить удовлетворительный уровень обслуживания новых абонентов. Задача оптимизации расположения макро базовых станций, основанная на покрытии, формулируется следующим образом:

$$Z1 = \min \left\{ \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} C^{mac} k1^{mbs} \right\} \quad (4.10)$$

где

$$\begin{aligned} \sum_{tb=1}^{N^{tt}} k3^{tt,mbs} k1^{mbs} &\geq 1 \\ L1^{tt,mbs} k3^{tt,mbs} k1^{mbs} &\leq R^{mac} \\ k1^{mbs} &\in \{0,1\} \\ k3^{tt,mbs} &\in \{0,1\} \end{aligned}$$

Задача оптимизации расположения микро базовых станций, основанная на качестве обслуживания, формулируется следующим образом:

$$Z2 = \min \left\{ \sum_{tt=1}^{N^{tt}} C^{mic} k2^{tt} + \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c1 L1^{mbs,tt} k1^{mbs} k2^{tt} + \sum_{ts=1}^{N^{ts}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c2 L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt} \right\} \quad (4.11)$$

где

$$\begin{aligned} \sum_{ts=1}^{N^{ts}} k4^{ts,tt} k2^{tt} &\geq 1 \\ L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt} &\leq R^{mic} \\ k2^{tt} &\in \{0,1\} \\ k4^{ts,tt} &\in \{0,1\} \end{aligned}$$

Решив задачу оптимизации по полученному критерию, получим структуру гетерогенной сети сотовой связи LTE, применяя к которой метод выбора сот по энергосбережению и пошаговое диммирование можно достичь существенного снижения суммарного энергопотребления подсистемой базовых станций.

4.3 Развертывание гетерогенной сети LTE в условиях крупного города

Рассмотрим территорию центральной части типового крупного города площадью 36 км² или 9 км на 4 км, представленную на рисунке 4.1.

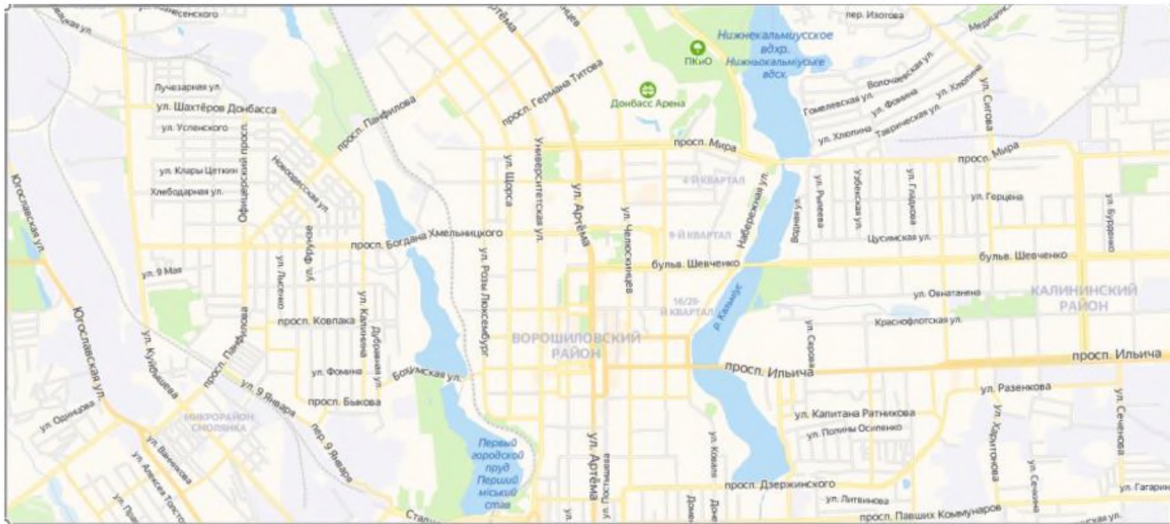


Рисунок 4.1 – Карта части крупного города с предполагаемым местом развертывания гетерогенной сети

Определим пять типов зон по виду сервиса: нежилые, жилые, придорожные, развлекательные и деловые. Чтобы обеспечить полное покрытие территории разместим на ней 1 655 тестовых точек, расположенных на расстоянии 150 м друг от друга. На рисунке 4.2 каждый тип зоны обозначен соответствующим типом заполнения.

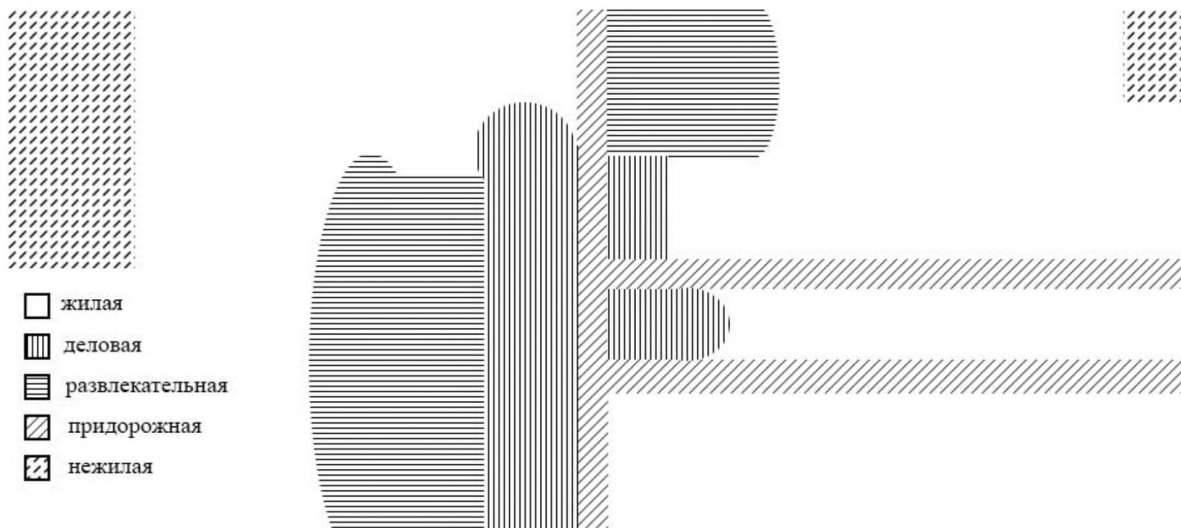


Рисунок 4.2 – Разделение района на зоны

На каждом квадратном километре возможны три варианта расположения макро базовой станции. Таким образом, всего возможных точек размещения

макро базовых станций 108. Распределение базовых станций по возможным местам развертывания выполнено в соответствии с особенностями рельефа и застройки местности отдельно по каждой оси координат. На рисунке 4.3 представлено возможное расположение макро базовых станций.

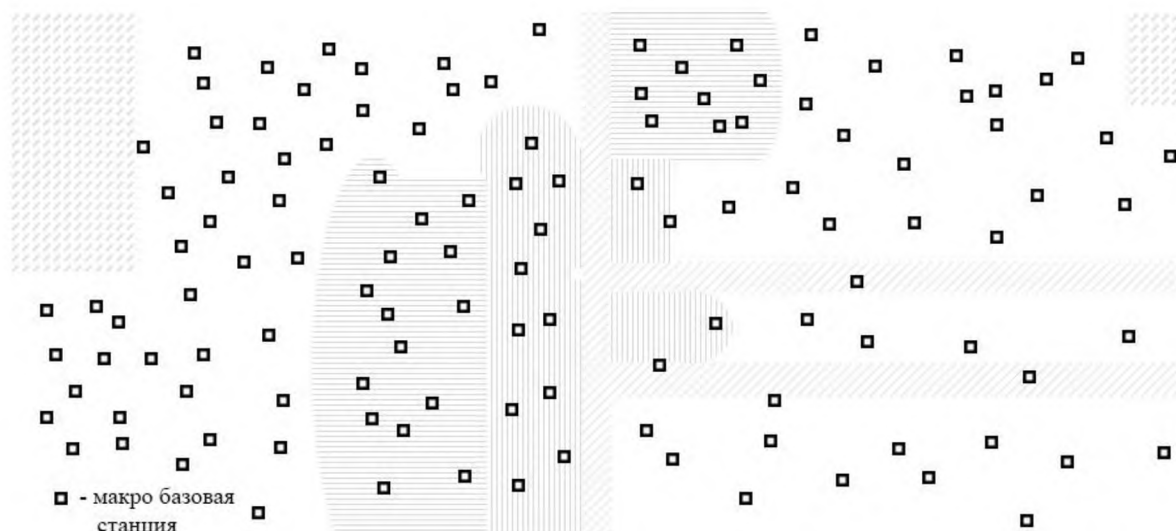


Рисунок 4.3 – Возможные места расположения макро базовых станций

Поскольку данные о трафике такой сотовой сети сложно получить, исходим из того, что на каждом квадратном километре будут находиться не более 2000 абонентов, а каждая точка потенциального скопления абонентов генерирует дополнительно 10% пользователей. При этом в зоне каждого типа находится различное количество таких точек из-за уникальных особенностей поведения абонентов в них. По данным IEEE плотность абонентов на квадратный километр от наиболее загруженных зон к наименее загруженным соотносится как 4,5:2:1,5:1. Считаем, что наиболее загруженным будут деловые районы, а наименее — жилые, поскольку в них доступ в интернет осуществляется, через домашние беспроводные подключения. Таким образом, чтобы определить требования к трафику в районе каждого типа необходимо учитывать плотность и размер каждого из них. В таблице 4.1 представлена информация о всех типах зон.

Таблица 4.1 – Сравнительная характеристика типов зон

	Деловая	Развлекательная	Придорожная	Жилая	Нежилая
Количество тестовых точек	227	304	76	921	132
Коэффициент дополнительных абонентов	4,5	2	1,5	1	0
Количество точек потенциального скопления абонентов на кв. км.	9	4	3	2	-
Площадь	5,91	6,54	1,73	20,45	1,37
Общее количество точек потенциального скопления абонентов	42	22	5	42	-

Используем тестовые точки в качестве возможных точек массового скопления абонентов и мест развертывания микро базовых станций. Микро базовые станции легче установить, и для них не требуется дополнительного пространства [21]. Все тестовые точки в районе располагаются согласно особенностям рельефа и застройки местности и характеристикам зон, приведенным в таблице 4.1. На рисунке 4.4 показан вариант расположения точек массового скопления абонентов в зонах разного типа.

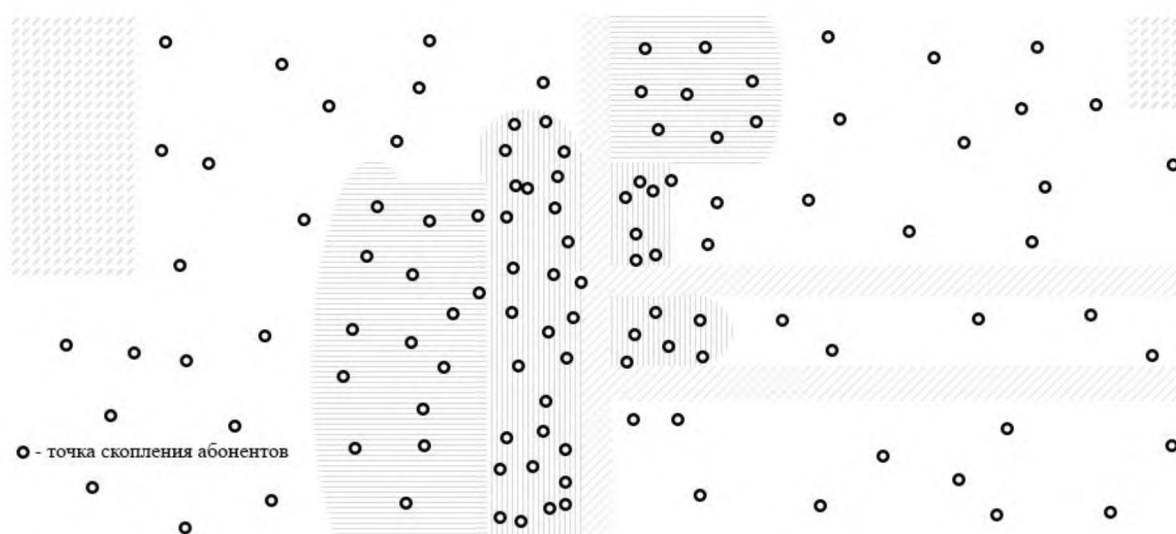


Рисунок 4.4 – Расположение точек массового скопления абонентов

Затем нормализуем средний уровень качества обслуживания в течение суток в процентах от максимального уровня в районе. Он представлен на рисунке 4.5.

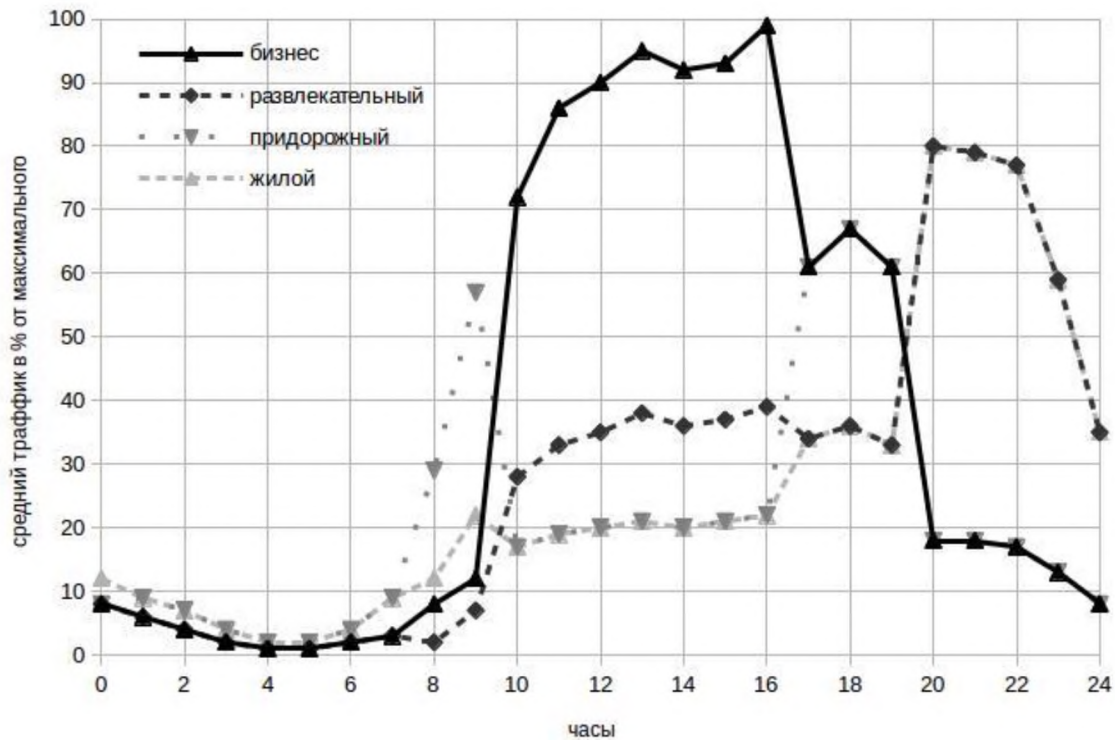


Рисунок 4.5 – Средний уровень качества обслуживания абонентов

Эти данные используем как исходные для моделирования количества абонентов каждый час.

4.4 Результаты моделирования

Рассмотрим 10 вариантов расположения макро базовых станций. Считаем, что каждая из них покрывает территорию радиусом 1200 м. Решим задачу оптимизации расположения базовых станций (4.10), основанную на обеспечении полного покрытия соты, симплекс-методом

Получим, что 9 из 10 вариантов дают требуемый результат, покрывая всю территорию. 3 из них требуют развертывания наименьшего количества макро базовых станций – 20. На рисунке 4.6 представлен один из этих вариантов.

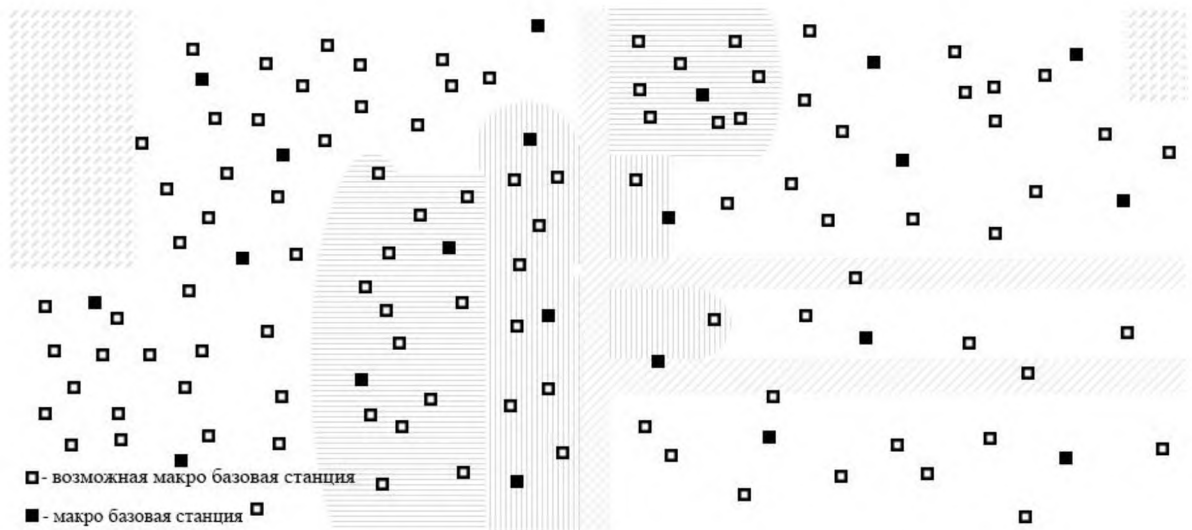


Рисунок 4.6 – Вариант развертывания макро базовых станций

Он является наиболее близким к реальности в заданных условиях по двум причинам. Во-первых, ни одна макро базовая станция не расположена в нежилой зоне. Во-вторых, существует несколько потенциальных мест развертывания в деловой зоне, где их найти труднее всего. Результат моделирования соответствует сценарию полного покрытия с точки зрения количества макро базовых станций.

После размещения макро базовых станций необходимо решить задачу оптимизации расположения микро базовых станций (4.11), основанную на качестве обслуживания, симплекс-методом.

Радиус зоны покрытия микро базовой станции составляет 150 м. Сотовая сеть может обеспечивать лучшее качество обслуживания и потреблять меньше электроэнергии, если микро базовые станции расположены ближе к точкам потенциального скопления абонентов. Таким образом, $c1=1$ и $c2=10$. чтобы микро базовые станции были расположены вблизи от точек потенциального скопления абонентов, а операционные затраты и капитальные расходы стремились к минимуму. Результатом решения задачи оптимизации, основанной на качестве обслуживания являются 111 микро базовых станций. На рисунке 4.7 представлено расположение микро базовых станций и транспортной сети с соответствующими макро базовыми станциями.

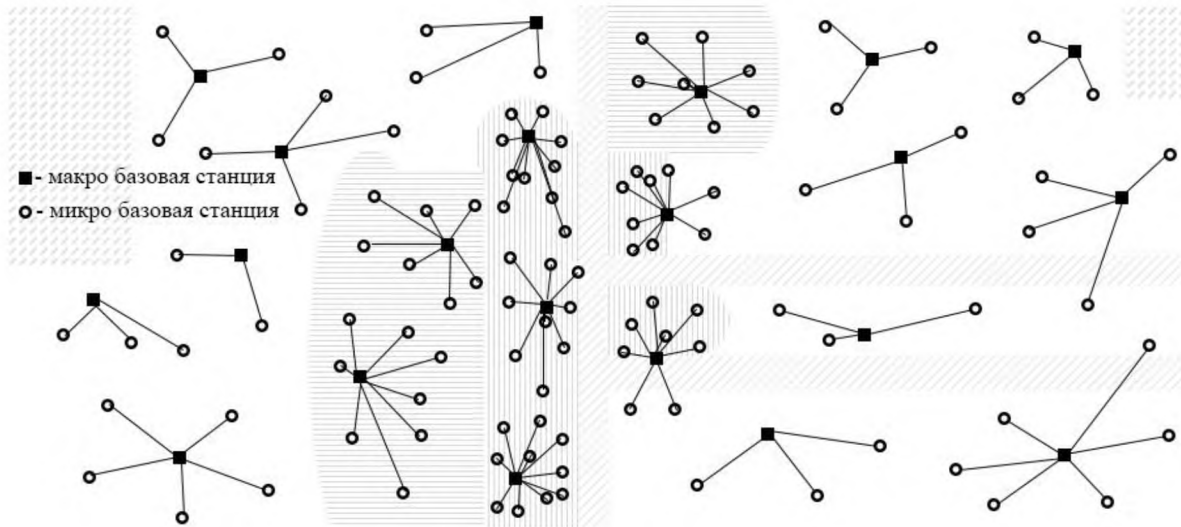


Рисунок 4.7 – Вариант развертывания гетерогенной сети LTE

Исходя из распределения базовых станций можно сделать вывод о том, что соты с макро и микро базовыми станциями могут давать более высокую энергоэффективность. Макро базовая станция и связанные с ней микро базовые станции ежеминутно обмениваются информацией по дополнительному протоколу. При использовании критерия выбора сот по энергосбережению микро базовые станции включаются только по сигналу от соответствующей макро базовой станции.

4.5 Анализ энергооптимизации в гетерогенной сотовой сети

В главе 2 рассмотрены различные критерии выбора сот и оптимизации энергосбережения в гетерогенных сотовых сетях LTE. Применим их сочетания к полученной сети

Для моделирования используем расположение базовых станций на рисунке 4.7. Сравним энергопотребление для трех различных сочетаний. При этом количество пользователей, их расположение и запросы будут постоянными. Проанализируем общее энергосбережение для всей сети. При этом рассмотрим

худший сценарий с точки зрения борьбы с помехами. Помехи будут создавать все остальные базовые станции при максимальной мощности передачи.

В таблице 4.2 представлены результаты оптимизации энергопотребления для трех вариантов управления сотовой сетью. Они отличаются критерием выбора сот и способом оптимизации потребления энергии. В первом случае используются критерий выбора сот на основе энергосбережения и оптимизация с пошаговым диммированием. Во втором случае критерий выбора сот на основе SNR и оптимизация с пошаговым диммированием. В третьем случае критерий выбора сот на основе SNR в сочетании с выключением базовых станций, в зоне обслуживания которых нет абонентов.

Таблица 4.2 – Сравнительные результаты оптимизации энергопотребления

Вариант	Энергосбережение и пошаговое диммирование	SNR и пошаговое диммирование	SNR и выключение базовых станций
Всего	74,38%	89,75%	97,27%
Макро базовые станции	72,06%	93,46%	100%
Микро базовые станции	90,19%	56,12%	88,09%

Согласно результатам моделирования использование критерия выбора сот по энергосбережению в сочетании с пошаговым диммированием позволяет снизить энергозатраты в наибольшей мере до 74,38% от общего потребления. Пошаговое диммирование снижает энергопотребление даже без использования критерия выбора сот по энергосбережению. Это подтверждает эффективность модели оптимизации на основе пошагового диммирования. Наибольший расход энергии вызывает управление методом только включения и выключения базовых станций.

Существует два основных преимущества использования сочетания критерия

выбора сот по энергосбережению с пошаговым диммированием. Во-первых, выбор сот по энергосбережению приводит к тому, что больше абонентов обслуживаются микро базовыми станциями по сравнению с выбором сот по SNR. В результате снижаются энергозатраты макро базовой станции. Таким образом, первый вариант снижает в большей степени энергопотребление макро базовых станций, а второй — микро базовых станций. Это единственный случай, когда микро базовые станции потребляют больше энергии в относительном выражении, чем макро базовые станции. А поскольку энергозатраты макро базовых станций больше, то это ведет к уменьшению потребления энергии сотой в целом. Во-вторых, этот вариант позволяет оптимизировать спектральные ресурсы базовых станций и мощность передачи сигнала ими в зависимости от запросов абонентов. Таким образом, удастся избежать потерь энергии при обслуживании абонентов.

Рассмотрим потребление электроэнергии в течение суток макро базовыми станциями, микро базовыми станциями и подсистемой базовых станций в целом. Оно представлено на рисунке 4.8.

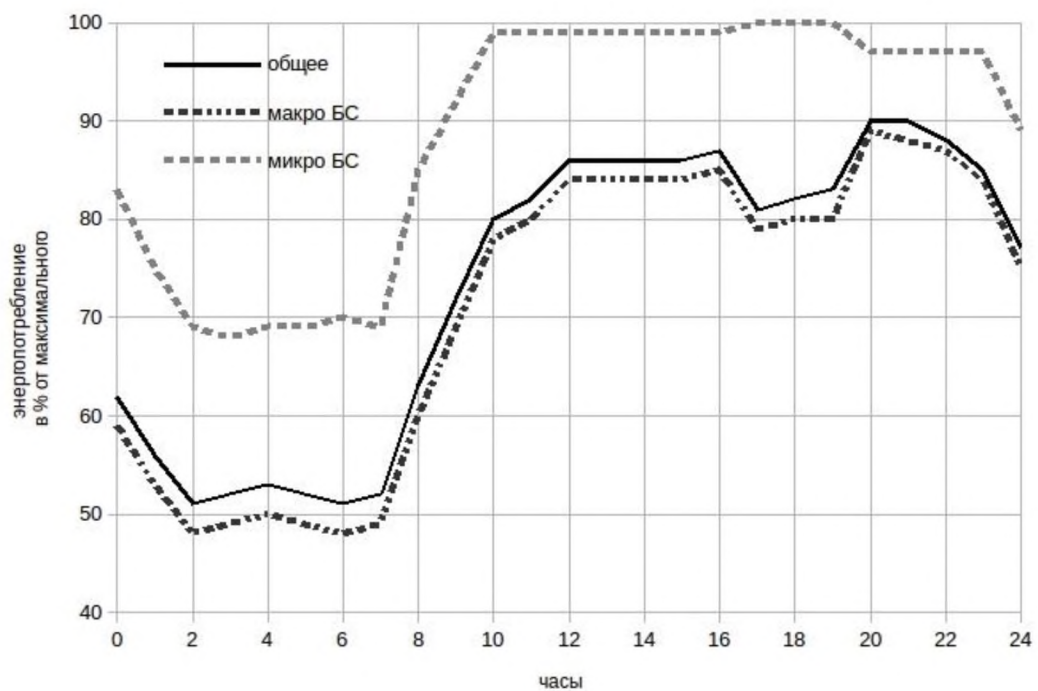


Рисунок 4.8 – Общее энергопотребление базовыми станциями в процентах от максимального.

Пик энергопотребления приходится на интервал от 20 до 21 часа. Кроме того, очевидно, что макро базовые станции влияют на суммарное потребление энергии больше, чем микро базовые станции. В интервале с 12 до 18 часов почти все микро базовые станции должны работать на полную мощность, а макро базовые станции могут экономить определённое количество энергии. Это происходит потому, что в период наибольшей загрузки в некоторых участках соты находится небольшое количество пользователей. На этих участках макро базовым станциям не требуется работать на полную мощность, чтобы удовлетворить запросы абонентов. Но это не полностью отображает эффект предложенной модели на соту с различными характеристиками трафика в зависимости от местонахождения. Поэтому выберем определённые группы базовых станций, чтобы исследовать эффект от неоднородности трафика на энергопотребление.

В деловых районах микро базовые станции загружены больше, чем макро базовые станции. Поскольку в таких зонах находится множество точек массового скопления абонентов и микро базовых станций, то они могут покрывать большую территорию и обслуживать больше абонентов. Таким образом, макро базовые станции получают возможность снизить потребление энергии. Особенно высокая экономия достигается в ночное время.

В развлекательных районах преимущество использования критерия выбора сот по энергосбережению очевидно. В период с 2 до 8 часов нагрузка на сеть в таких районах относительно невелика. В основном, небольшое количество запросов требует работы только макро базовых станций. Следовательно, микро базовым станциям в среднем необходимо значительно меньше электроэнергии. В развлекательных районах потребление энергии не всегда пропорционально объему трафика. Это связано с тем, что в одной из сот множество микро базовых станций расположены в деловой зоне, но они подключены в макро базовой станции в развлекательной зоне. А трафик в деловой зоне намного выше, чем в развлекательной.

Придорожные районы являются достаточно узкими и со специфическим расположением базовых станций. Поэтому на их работу существенно влияют соседние зоны. Соседние развлекательные и жилые районы генерируют очень большой объем трафика ночью. Но с 9 часов нагрузка в этих зонах становится меньшей, чем в самой придорожной. В это время микро базовые станции переходят в режим повышенного потребления энергии, а макро базовые станции снижают энергопотребление почти до самого низкого возможного значения, достаточного, чтобы обеспечить минимальный уровень обслуживания. С другой стороны, в ночное время макро базовые станции потребляют значительное количество энергии из-за высокой нагрузки на соседние районы. Поскольку микро базовые станции расположены поблизости от макро базовых станций, макро базовые станции должны удовлетворят запросы удалённых абонентов.

Жилые районы покрывают наибольшую часть территории города. Из-за значительного разброса в расположении точек массового скопления абонентов макро базовые станции должны работать почти на полную мощность, чтобы обеспечить требуемый уровень обслуживания абонентов во время ночного пика. Однако на практике в жилых помещениях могут использовать другие способы доступа в интернет. В таком случае, мобильный трафик окажется относительно малым. Тогда количество запросов на высокоскоростную передачу данных и, следовательно, потребление энергии макро базовыми станциями станет значительно более низким.

Рассмотрим качество обслуживания, предоставляемое сотовой сетью пользователям. Из результатов имитационного моделирования следует, что уровень удовлетворения запросов пользователей при использовании сочетания метода выбора сот по энергосбережению с пошаговым диммированием ниже, чем в других случаях ранним утром. Однако этот уровень повышается на протяжении остальной части дня, когда трафик значительно больше. В худшем из возможных случаев на результат серьезно повлияет интерференция. Когда в сети находится небольшое количество пользователей, система пытается оптимизировать потребление энергии, снижая мощность передачи и сокращая спектральный

ресурс, выделяемый пользователям. При этом качество обслуживания наиболее ухудшится у тех абонентов, которые, которые наиболее удалены от базовых станций и наиболее подвержены интерференции сигналов от соседних базовых станций. Эта проблема может быть решена, если сеть использует метод подавления интерференции. Тогда уровень удовлетворения запросов пользователей увеличится. Кроме того, низкий уровень удовлетворения запросов пользователей может быть обусловлен недостатками метода выбора сот по энергосбережению. Этот метод ориентирован на снижение потребления энергии макро базовыми станциями. Следовательно, как только трафик достигнет определенного значения макро базовая станция передаст посредством хэндовера часть абонентов микро базовым станциям. При определённых обстоятельствах значительное количество пользователей переполнит зоны обслуживания микро базовых станций и будут ограничены в ресурсах. Компромисс между потенциальным дополнительным энергопотреблением макро базовыми станциями для обслуживания большего количества пользователей и снижением качества обслуживания абонентов микро базовыми станциями станет предметом дальнейшего изучения. С другой стороны, преимущество пошагового диммирования очевидно при большом трафике в сети. Возможность стратегического управления ресурсами увеличивает качество обслуживания пользователей. В сравнении с другими вариантами сочетание критерия выбора сот по энергосбережению с пошаговым диммированием позволит удовлетворить запросы большего количества абонентов. Более того, на количество пользователей, получающих удовлетворительное качество обслуживания, влияет избыток абонентов в отдельных районах. Так с 12 до 16 часов большое количество пользователей находится в деловых районах, снижая качество обслуживания из-за ограниченности ресурсов. С 16 до 20 часов большинство абонентов сосредоточено в придорожных или развлекательных районах. С 20 до 24 часов значительное количество пользователей находятся в жилой зоне. Поскольку жилые районы охватывают наибольшую территорию, относительное

количество абонентов в ней является самым высоким и в наибольшей степени влияет на общий уровень качества обслуживания.

В целом, сеть может повысить эффективность работы и удовлетворить запросы большего количества абонентов во время пиковых нагрузок имеющимися ресурсами. В случае использования сочетания критерия выбора сот по энергосбережению с пошаговым диммированием модель позволяет поддерживать удовлетворительный уровень обслуживания при достаточно низком энергопотреблении особенно в периоды низкой нагрузки на сеть. Этот показатель снижается при увеличении трафика. Такой эффект обусловлен снижением качества обслуживания пользователей из-за нехватки ресурсов и повышением энергопотребления для обслуживания абонентов имеющимися ресурсами.

Рассмотрим качество обслуживания пользователей в районах разного типа. Наиболее низким его уровень будет в деловой зоне на протяжении всех суток. Главной причиной этого служит нехватка ресурсов. Такая же ситуация наблюдается и в других зонах в периоды наибольшей нагрузки, особенно в 20 часов. С другой стороны, этот показатель сравнительно высок в периоды небольшой загрузки в придорожных и развлекательных районах.

Изучение сот позволяет выявить зоны с низким соотношением SNR. Дополнительные микро базовые станции могут улучшить качество обслуживание абонентов в этих зонах

Наибольшая нагрузка в сети фиксируется в 20 часов. Среднее количество абонентов на квадратный километр составляет 68, 50, 47 и 192 в деловой, развлекательной, придорожной и жилой зонах соответственно. Таким образом, каждая базовая станция обслуживает в среднем 13.8 пользователей. Следовательно, предлагаемая сеть может повысить качество обслуживания пользователей почти до 90%. При этом в условия реального города возможны ситуации, в который макро базовая станция будет находиться в зоне одного типа, а подключённые к ней микро базовые станции — в зоне другого типа. Поэтому итоговые показатели берутся в среднем по городу.

Исследуем изменения значений предполагаемой величины трафика. Рассмотрим случаи, в которых трафик будет на 10% меньше и на 10% больше предполагаемого значения при использовании сочетания метода выбора сот по энергосбережению с пошаговым диммированием.

Таблица 4.3 – Энергопотребление при различных значениях трафика в процентах от максимального значения

Вариант	-10%	Текущий	+10%
Всего	70,14%	73,56%	76,43%
Макро базовые станции	67,89%	71,89%	75,38%
Микро базовые станции	89,12%	89,49%	89,77%

Таблица 4.3 отражает влияние трафика на энергопотребление сетью. Изменение величины трафика на 10% приводит к изменению энергопотребления примерно на 3%. Основные изменения касаются макро базовых станций. Их энергопотребление изменяется почти на 4%. С другой стороны, изменение величины трафика незначительно влияет на расход энергии микро базовыми станциями. Критерий выбора сот по энергосбережению приводит к тому, что как можно больше пользователей обслуживаются микро базовыми станциями. Таким образом, они будут работать почти на полную мощность, а макро базовые станции снизят потребление энергии. Однако при увеличении трафика на 10% макро базовые станции станут потреблять больше энергии, чтобы удовлетворять повысившиеся запросы пользователей.

Исходя из результатов имитационного моделирования, периоды низкой нагрузки достаточно продолжительны. В это время качество обслуживания пользователей одинаково. Но при меньшем трафике в 8 часов система обслуживает абонентов более качественно. В периоды средней нагрузки качество обслуживания существенно снижается при росте трафика на 10%. Нехватка доступных ресурсов начинает влиять в некоторых районах, где это не

происходило при текущем значении. В то же время, в период высокой нагрузки с 20 до 22 часов качество обслуживания пользователей относительно выше при пониженном трафике.

Модели оптимизации для обширных территорий содержат большое количество переменных. А точное моделирование процессов, происходящих в сетях такого масштаба, требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому для того, чтобы подобные задачи можно было решать на отдельно взятом компьютере необходимо принимать ряд допущений и упрощений. Также в исследованиях на эту тему исходят из предположения об отсутствии ограничений на служебную информацию, передаваемую между базовыми станциями. Но дополнительные алгоритмы, предназначенные для управления нагрузкой или снижения потребления электроэнергии, создают существенный объем трафика служебной информации. Поскольку управление гетерогенной сотовой сетью становится более сложным процессом, то рост объема служебного трафика становится более серьезной проблемой.

Критерий выбора сот по энергосбережению дает наилучшие результаты там, где на протяжении значительного времени трафик находится на достаточно низком уровне. А пики трафика создают намного более высокую нагрузку на протяжении короткого интервала времени. Примерами мест, где критерий выбора сот по энергосбережению приносит наибольшую выгоду, являются конференц-залы, спортивные и развлекательные учреждения, остановки общественного транспорта.

Кроме того, существует несколько направлений дальнейших исследований, позволяющих улучшить энергосбережение в гетерогенных сотовых сетях LTE.

На данный момент система может сменять критерий выбора сот по энергосбережению на критерий выбора сот по полосе пропускания, когда количество запросов пользователей превышает пороговое значение, при котором макро базовая станция может обеспечить достаточный спектральный ресурс и качество услуг, чтобы удовлетворить запросы абонентов. Такой подход дает хорошие результаты, когда количество запросов резко возрастает от значения

ниже порогового до значения намного выше его. Когда количество запросов абонентов незначительно превышает пороговое значение, система включает микро базовые станции, чтобы снять нагрузку с макро базовой станции. После этого нагрузка на каждую базовую станцию становится невысокой. Особенно это касается макро базовой станции. Результаты данной работы показывают, что в этом случае экономия электроэнергии будет несущественной. Таким образом, вместо включения множества микро базовых станций, чтобы сбалансировать нагрузку на сеть, системе может понадобиться их меньшее количество. Меньшее количество микро базовых станций может обслужить пользователей, которые отключаются от макро базовой станции, работающей на наименьшей мощности передачи. Такой подход может повысить энергоэффективность макро базовых станций в подобных ситуациях.

При использовании критерия выбора сот по энергосбережению пользователи подключаются к базовым станциям, исходя из минимизации потребления электроэнергии. Затем с помощью методов управления ресурсами базовой станции оптимизируется мощность передачи данных в соответствии с количеством подключенных пользователей. Одновременное применение критерия выбора сот по энергосбережению с методиками управления ресурсами базовых станций в рамках одной процедуры может сократить время на управление сетью. Такая процедура поможет решить вопросы, связанные с улучшением выбора сот по энергосбережению.

Из-за отсутствия универсальных стандартов по управлению последствиями возникновения интерференции, в данном исследовании исходили из наиболее высокого уровня интерференции. Применение способов снижения интерференции может обеспечить такое управление спектральными ресурсами, которое ограничит интерференцию и улучшит общую производительность сети.

В стандарте LTE используется преимущественно технология MIMO. При наличии нескольких антенн система может экономить значительное количество электроэнергии даже без использования механизмов энергосбережения. Однако, с

учетом резкого роста количества запросов пользователей в ближайшем будущем количество потребляемой энергии достигнет критических значений.

4.6 Экономический эффект от энергосбережения

Найдём операционные расходы на функционирование гетерогенной сотовой сети LTE.

$$C_n = (N_{macbs}E_{macbs} + N_{micbs}E_{micbs})CE_{bs}N_y \quad (4.12)$$

где N_{macbs} – количество макро базовых станций в сети;

E_{macbs} – годовое энергопотребление макро базовой станции;

N_{micbs} – количество микро базовых станций в сети;

E_{micbs} – годовое энергопотребление микро базовой станции;

CE_{bs} – стоимость 1 кВтч;

N_y – срок эксплуатации сети.

Стоимость 1 кВтч для субъектов хозяйственной деятельности, потребляющих напряжение менее 27,5 кВ, в ДНР составляет 4,38 российских рубля. Среднегодовое потребление энергии макро одной базовой станцией составляет 35300 кВтч, а одной микро базовой станцией – 365 кВтч. Исходя из того, что срок службы гетерогенной сети LTE составляет 10 лет операционные расходы на функционирование приведенной сети, состоящей из 20 макро базовых станций и 111 микро базовых станций, без использования методов энергосбережения составят.

$$C_n = (20 \cdot 35300 + 111 \cdot 365) \cdot 4,38 \cdot 10 = 32\,697\,357 \text{ росс. рублей}$$

Использование критерия выбора сот по SNR в сочетании с выключением базовых станций снизит операционные расходы до C_{ne} :

$$C_{ne}=32\,697\,357 \cdot 0,8975 = 29\,345\,878 \text{ росс. рублей}$$

Использование критерия выбора сот по SNR в сочетании с пошаговым диммированием макро базовых станций снизит операционные расходы до C_{ne} :

$$C_{ne}=32\,697\,357 \cdot 0,9727 = 31\,804\,719 \text{ росс. рублей}$$

Использование критерия выбора сот по энергосбережению в сочетании с пошаговым диммированием макро базовых станций снизит операционные расходы до C_{ne} :

$$C_{ne}=32\,697\,357 \cdot 0,7438 = 24\,320\,294 \text{ росс. рублей}$$

Таким образом, предложенное сочетание критерия выбора сот по энергосбережению с пошаговым диммированием позволит сэкономить 8 377 063 российских рублей за 10 лет.

Выводы по разделу 4

1. Составлен критерий оптимизации расположения базовых станций в гетерогенной сети сотовой связи LTE с учетом минимизации капитальных затрат и качества обслуживания
2. Задача оптимизации расположения базовых станций гетерогенной сотовой сети LTE разделена на две части: задача оптимизации расположения макро базовых станций, основанная на покрытии, и задача оптимизации расположения микро базовых станций, основанная на качестве обслуживания.
3. Предложен вариант развертывания гетерогенной сети сотовой связи LTE в центральной части г. Донецка.

4. В результате моделирования получен вариант расположения микро базовых станций, при котором они находятся наиболее близко к точкам массового скопления людей.

5. Представлены схемы расположения базовых станций, отражающие результаты моделирования.

6. Решение задачи оптимизации энергопотребления полученной гетерогенной сетью LTE симплекс-методом с использованием выбранного критерия для различных вариантов сочетаний показало, что наилучшие результаты дает метод выбора сот на основе энергосбережения и оптимизация с пошаговым диммированием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение важной научно-практической задачи повышения эффективности функционирования перспективной городской гетерогенной сотовой сети LTE на основе оптимизации потребления энергии базовыми станциями путем анализа их загрузки, детерминирования их выключения и диммирования в сочетании с актуализацией критерия выбора сот абонентским оборудованием.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Проанализированы тенденции развития сотовых сетей связи четвертого поколения стандарта LTE. Показано, что в связи с увеличением трафика и плотности абонентов в крупных городах основным принципом их развертывания является построение гетерогенной сети. Определены основные факторы, влияющие на энергопотребление в подсистеме базовых станций гетерогенной сотовой сети LTE. Формализована задача управления энергопотреблением в сотовой сети LTE.

2. Проведено исследование критериев выбора сот для гетерогенной сотовой сети LTE в условиях крупного города. Спрогнозированы плотность пользователей и генерируемый трафик. Рассмотрены четыре основные критерия выбора сот в гетерогенных сотовых сетях четвертого поколения LTE: по расстоянию; по уровню сигнал/шум; по полосе пропускания; по энергосбережению.

3. Определены достоинства и недостатки различных критериев выбора сот, оценена возможность их использования для построения системы эффективного управления режимами энергосбережения в гетерогенной сети LTE. Критерии выбора сот на основе пропускной способности и на основе энергосбережения дают возможность снизить общее потребление энергии в сети, сбалансировать количество пользователей в микросотах и макросотах, управлять качеством услуг для абонентов в двухчастотной системе.

4. Разработана модель снижения энергопотребления в гетерогенной сотовой сети LTE с пошаговым диммированием базовых станций макросот. Исследовано

влияние пошагового диммирования макро базовых станций в сочетании с детерминированием критерия выбора сот на возможности энергосбережения в гетерогенной сотовой сети LTE.

5. Составлен критерий оптимизации, позволяющий за счет изменения коэффициента диммирования макро базовой станции и включения/выключения микро базовых станций в сочетании с актуализацией критерия выбора сот, с учетом ограничений, обеспечивающих качество предоставляемых услуг, на основе анализа текущих показателей и территориального распределения трафика обеспечить минимизацию энергопотребления гетерогенной сотовой сетью LTE.

6. Проведено моделирование функционирования участка гетерогенной сотовой сети LTE центральной части типового крупного города. Для управления режимами подсистемы базовых станций используется предложенный метод сокращения энергопотребления. Проведен анализ результатов моделирования, доказывающий эффективность предложенного алгоритма минимизации энергопотребления гетерогенной сотовой сетью LTE. Использование критерия выбора сот по энергосбережению в сочетании с пошаговым диммированием снижает потребление энергии базовыми станциями сети на 30,8%.

7. Получил дальнейшее развитие метод планирования гетерогенной сотовой сети LTE на основе критерия структурной оптимизации с учетом плотности абонентов и типов зон обслуживания при обеспечении заданного уровня качества обслуживания. Задача оптимизации разделена на две части: задача оптимизации расположения макро базовых станций, основанная на покрытии, и задача оптимизации расположения микро базовых станций, основанная на качестве обслуживания.

8. В результате моделирования получен вариант расположения базовых станций гетерогенной сотовой сети LTE, при котором микро базовые станции находятся наиболее близко к точкам массового скопления людей. Представлены схемы расположения базовых станций, отражающие результаты моделирования.

9. Решение задачи оптимизации энергопотребления полученной гетерогенной сетью LTE симплекс-методом с использованием выбранного

критерия для различных вариантов сочетаний показало, что наилучшие результаты дает критерий выбора сот на основе энергосбережения и оптимизация с пошаговым диммированием. Он позволяет снизить энергозатраты сети на 25,62%

10. Разработаны рекомендации по использованию метода планирования гетерогенной сотовой сети LTE при проектировании и в процессе эксплуатации таких сетей. Результаты исследования используются в учебном процессе кафедры «Автоматика и телекоммуникации» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» и внедрены в производственный процесс ГП «РОС».

11. В результате применения предложенных методов достигнуто повышение эффективности функционирования перспективной городской гетерогенной сотовой сети LTE на основе оптимизации потребления энергии базовыми станциями путем анализа их загрузки, детерминирования их выключения и диммирования в сочетании с актуализацией критерия выбора сот абонентским оборудованием.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

2G – второе поколение сотовой связи;

3G – третье поколение сотовой связи;

4G – четвертое поколение сотовой связи;

АС – абонентская станция;

БС – базовая станция;

ВК – вентиляция и кондиционирование;

ВО – вспомогательное оборудование;

ПО – программное обеспечение;

РБ – ресурсный блок.

ССС – системы сотовой связи;

ТП – территориальное планирование;

ТфОП – сеть телефонной связи общего пользования;

3GPP (The 3rdGenerationPartnershipProject) - партнерский проект ETSI, занимающийся стандартизацией в области сетей 3G;

AUC – центр аутентификации сети GSM;

BSS (BaseStationSystem) – система базовых станций;

BSC – контроллер базовых станций;

BTS – базовая станция;

eNB (eNodeB) - базовая станция сети стандарта LTE;

LTE (Long Term Evolution) – технология высокоскоростной пакетной передачи данных для третьего поколения сотовой связи;

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – метод пространственного кодирования сигнала;

NodeB – базовая станция системы сотовой связи стандарта UMTS;

NSS (Network Switching System) – система коммутации;

PDN Gateway – входной-выходной шлюз;

QoS (Quality of Service) – качество услуг связи;

RSSI – received signal strength indicator (показатель уровня принимаемого сигнала);

SDTV – (Standard-definition television) – телевидение стандартной четкости;

SNR – signal-to-noise ratio (отношение сигнал/шум - ОСШ);

SMS – передача текстовых сообщений;

SON – (Self Organizing Networks) – самоорганизующиеся сети;

SUI – канальная модель распространения сигналов;

VLR – визитный регистр местоположения;

UE – user equipment (пользовательское оборудование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, С. Д. Пространственно-временной подход к анализу гетерогенных систем связи / С. Д. Андреев, Е. А. Кучерявый, К. Е. Самуйлов // Электросвязь. — 2018. — № 9. — С. 20–26.
2. Андреев, С. Д. Управление потоками в гетерогенных мобильных сетях радиодоступа с соединениями устройство — устройство / С. Д. Андреев, К. Е. Самуйлов, А. М. Тюрликов // Вестник РУДН. Серия: Математика. Информатика. Физика. — 2018. — Т. 26, № 4. — С. 357–370.
3. Андрианов, В.И. Средства мобильной связи / Андрианов В.И., Соколов А.В. // – СПб.:Петербург, Арлит, 1998. – 256 с.
4. Анисимов, А. В. Управление энергоэффективной доставкой информации на абонентскую станцию / А. В. Анисимов, С. Д. Андреев, А. М. Тюрликов // Электросвязь. — 2011. — № 4. — С. 56–61.
5. Бабков, В.Ю. Подходы к планированию и оптимизации сетей LTE: учебник. [Электронный ресурс] / В.Ю. Бабков // - Санкт-Петербург, 2012. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/56362470-Podhody-k-planirovaniyu-i-optimizacii-setey-lte-v-yu-babkov.html> (дата обращения: 12.10.2020).
6. Бабков, В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. Учебное пособие для вузов / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов // – 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 224 с.
7. Бабков, В.Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи. (2-е изд. перер. и доп.) / В.Ю. Бабков - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2013. - 432 с.
8. Береснев, А.В. Алгоритм локализации абонентской нагрузки в пространстве и времени в сотовых системах подвижной радиосвязи стандарта GSM. Журнал радиоэлектроники. 2002г. №11.
9. Бойко, М.П. Системи стільникового зв'язку : конспект лекцій. / М.П. Бойко - Одеса : ОНАЗ, 2004. 76 с.
10. Бузов, А.Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебн. пособие / А.Л. Бузов, М.А.

Быховский, Н.В. Васехо и др. Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского // - М.: Эко-Трендз, 2006.-376с.:илл.

11. Весоловски, К. Системы подвижной радиосвязи / Пер. с польского Н.И. Рудицкого. Под ред. А.И. Дедовского // М.: Горячая линия -Телеком. 2006. - 536 с.

12. Вишневский, В.М. WiMAX: Путь к 4G: Энциклопедия / Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. // - Москва, 2009. 472 с.

13. Вишневский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, И.В. Шахнович, С.Л. Портной. -М.: Техносфера, 2005. - 456 с.

14. Гайдамака, Ю. В. Модели и методы анализа и расчета показателей эффективности беспроводных гетерогенных сетей : монография / Ю. В. Гайдамака, Э. С. Сопин, И. А. Гудкова и др. // — М. : ФИЦ ИУ РАН, 2018. —71 с.

15. Галкин, В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 432с.

16. Гетерогенные сети: ключевые технологии HetNet и сценарии развертывания. [Электронный ресурс]. URL: <http://1234g.ru/4g/lte/struktury-setej-lte/geterogennye-seti-klyuchevye-tekhnologii-hetnet-i-stsenarii-razvertyvaniya> (дата обращения: 12.10.2020).

17. Гольдштейн, Б. С. Сети связи : Учебник для ВУЗов / Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский. — СПб. : БХВ-Петербург, 2014. — 400 с.

18. Дзюба, А.В. Задача оптимизации энергопотребления гетерогенной сетью LTE в условиях крупного города ./ Дзюба А.В., Червинский В.В. // Информатика и кибернетика, 2019 - №4 (18). – с. 57 -64.

19. Дзюба, А.В. Минимизация энергопотребления в гетерогенной сети LTE для условий крупного города / Дзюба А.В. // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. –Донецк : ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР. – 2020. –Вып. 1 (21). – С. 132-139.

20. Дзюба, А.В. Оптимизация расположения базовых станций в гетерогенных сетях сотовой связи LTE / Дзюба А.В. // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 55-59.
21. Дзюба, А.В. Практическое использование метода оптимизации структуры гетерогенной сети LTE с учетом минимизации энергопотребления. / Дзюба А.В. // Информатика и кибернетика, 2020 - №3 (21). – С. 5-12.
22. Дмитриев В.Н. Способы организации высокоскоростных сетей передачи информации при помощи подвижных базовых станций / Дмитриев В.Н., Пищин О.Н., Сорокин А.А.// Телекоммуникационные и информационные системы / Труды междунар. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007.-512 с. (С.139-143). ISSN 5-7422-1583-5.
23. Ермолаев, С.Ю. Оптимальное размещение базовых станций / С.Ю. Ермолаев // TelecommunicationSciences. - 2010. - Т. 1, №1. - С. 82-90.
24. Казаковцев, Л.А. Задача выбора оптимального размещения элементов беспроводной сети / Л.А. Казаковцев, М.Н. Гудыма, А.А. Ступина, Ю.И. Кириллов // Современные проблемы науки и образования [электронное издание].– 2013.–вып.3.– URL <http://elibrary.ru/download/29613015.pdf>. (дата обращения: 12.10.2020)
25. Карпенко, А.П. Методы оптимизации: базовый курс [Электронный ресурс]: конспект лекций / А.П. Карпенко // МГТУ им. Н.Э.Баумана. – Москва, 2010.– Режим доступа:<http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/base.cou> (дата обращения: 12.10.2020).
26. Кучерявый, А. Е. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый. —М. : ФГУП ЦНИИС, 2008. — 296 с.
27. Одарченко, Р.С. Исследования основных недостатков базовых станций разных поколений сотовой связи / Р.С. Одарченко / Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. №3. С. 81-89

28. Одарченко, Р.С. Метод балансирования нагрузки в опорной сети сотового оператора. / Р.С. Одарченко, Абакумова А.О. // Наукоемні технології. 2016. №32 (4). С. 369-375
29. Одарченко, Р.С. Метод резервирования ресурсов и балансирования нагрузки в транспортной сети с учетом основных характеристик сетей / Одарченко, Р.С., Харлай Л.О. // Технічні науки та технології. 2018. №1(11). С. 89-96
30. Рыжков А.Е. Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMax. / А.Е. Рыжков, М.А. Сиверс, В.О. Воробьев, А.С. Слышков, Р.В. Шуньков // - Санкт-Петербург: Линк, 2012. – 226 с.
31. Скрынников В.Г Проблемы планирования и обеспечения ЭМС сетей LTE. Сети мобильной связи LTE: технологии и практика: материалы семинара МСЭ для стран СНГ. 03-05 марта 2014, г. Москва
32. Скрынников В.Г., Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. – М.: Издательство "Спорт и Культура – 2000", 2013.– 864 с.
33. Соколов Н. Оценка параметров зоны обслуживания сети LTE. Часть 2 (Исправленная) / Н. Соколов [Электронный ресурс]. URL <http://omoled.ru/publications/view/737>
34. Сотовая связь История Стандарты Технологии, 2G. GSM [Электронный ресурс] - Режим доступа <http://celnet.ru/2G.php/> - Загл. с экрана (дата обращения: 12.10.2020).
35. Сотовая связь История Стандарты Технологии, 3G. UMTS [Электронный ресурс] - Режим доступа <http://celnet.ru/3G.php/> - Загл. с экрана (дата обращения: 12.10.2020).
36. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: [підручник для вищ. навч. закладів] / Стеклов В.К., Беркман Л.Н., Кільчицький Є.В. // – К.: Техніка, 2004. – 576 с.
37. Степутин, А. Н. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 томах. Том1 / А.Н. Степутин, А.Д. Николаев. // –2-е изд. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 384 с. : ил.

38. Степунин, А. Н. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 томах. Том2 / А.Н. Степунин, А.Д. Николаев. // –2-е изд. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 420 с. : ил.
39. Тихвинский, В.О. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура [Текст] / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук // – Москва: Эко-Трендз, 2010.– 284 с.
40. Трифонов, А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения [Электронный ресурс] /А.Г. Трифонов // Консультационный центр MATLAB компании Softline. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/16.php/ Загл. с экрана (дата обращения: 12.10.2020).
41. Чеботарёва, Д.В. Выбор оптимальной топологии транспортной сети мобильной связи с учетом противоречивых показателей качества. [Электронный ресурс] / Д.В. Чеботарева, Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2013. № 766. С. 124-131. Режим доступа: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/23421/1/21-124-131.pdf> (дата обращения: 12.10.2020)
42. Червинский, В.В. Исследование методов выбора сот для условия перспективной гетерогенной сети LTE г. Донецка / Червинский В.В., Дзюба А.В. // Сборник научных трудов ДониЖТ. – Донецк: ДониЖТ, 2020. – Вып. 56. – С. 31-42.
43. Черноруцкий, И.Г. Методы оптимизации в теории управления / И.Г. Черноруцкий. – СПб.: Питер, 2004. – 256с.
44. Akyildiz, I. F. The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced / I. F. Akyildiz, D. M. Gutierrez-Estevez, E. C. Reyes // Physical communication. — 2010.— Vol. 3, no. 4. — Pp. 217–244.
45. Amaldi, E. Planning UMTS base station location: optimization models with power control and algorithms / Amaldi E., Capone A., Malucelli F // IEEE Trans. Wireless Commun., 2:939-952, Sept. 2003.

46. Ambrosy A. Dynamic Bandwidth Management for Energy Savings in Wireless Base Stations [Электронный ресурс] / A. Ambrosy, Wilhelm M., Wajda W., Blume O. // Globecom 2012, SessionSAC-GNCS8, Anaheim, Dec. 6th 2012. URL <https://pdfs.semanticscholar.org/698e/a8a8e4e3825c449a537be4fead1bf4703fc5.pdf>

(дата обращения: 13.10.2020)

47. Andrews, J. G. An overview of load balancing in HetNets: Old myths and open problems / J. G. Andrews, S. Singh, Q. Ye, et al. // IEEE Wireless Communications. — 2014. — Vol. 21, no. 2. — Pp. 18–25.

48. Andrews, J. G. Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift / J. G. Andrews // IEEE Communications Magazine. — 2013. — Vol. 51, no. 3.— Pp. 136–144.

49. Andreev, S. Intelligent access network selection in converged multi-radio heterogeneous networks / S. Andreev, M. Gerasimenko, O. Galinina, et al. //IEEE Wireless Communications. — 2014. — Vol. 21, no. 6. — Pp. 86–96.

50. Boiardi, S. Radio planning and management of energy-efficient wireless access networks / S. Boiardi [Электронный ресурс]. URL https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/99707/1/2014_07_PhD_Boiardi.pdf

(дата обращения: 13.10.2020)

51. Borst, S. Optimal resource allocation in HetNets / S. Borst, S. Hanly, P. Whiting // IEEE International Conference on Communications (ICC) / IEEE. — Budapest, Hungary, 2013. — Pp. 5437–5441.

52. Deruyck, M. Modelling and Optimization of Power Consumption in Wireless Access Networks / M. Deruyck, E. Tanghe, J. Wout, L Martens. [Электронный ресурс]. URL <https://biblio.ugent.be/publication/2040174/file/2040183>

(дата обращения: 13.10.2020)

53. Dhillon, H. S. Load-aware modeling and analysis of heterogeneous cellular networks / H. S. Dhillon, R. K. Ganti, J. G. Andrews // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2013. — Vol. 12, no. 4. — Pp. 1666–1677.

54. Erceg, V. Channel models for fixed wireless applications / V. Erceg, K.V.S Hari, et al. // Tech. Rep. IEEE 802.16a-03/01, June 2003.

55. Ericsson. More than 50 billion connected devices [Электронный ресурс] // White paper. — 2011. — Режим доступа: https://www.akos-rs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna_agenda/Internetni_protokol_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf/ Загл. с экрана (дата обращения: 13.10.2020).
56. Florea, R. Networking Solutions for Integrated Heterogeneous Wireless Ecosystem / R. Florea, A. Ometov, A. Surak, et al. // J. Sen (Eds.): Cloud Computing. — InTechOpen. — 2017. — Pp. 103–128.
57. Galinina, O. Energy-efficient operation of a mobile user in a multi-tier cellular network / O. Galinina, A. Trushanin, V. Shumilov, et al. // Proceedings of International Conference on Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications / Springer. — Ghent, Belgium, 2013. — Pp. 198–213.
58. Galinina, O. Modeling Multi-Radio Coordination and Integration in Converged Heterogeneous Networks / O. Galinina, S. Andreev, A. Pyattaev, et al. // R. Vannithamby, S. Talwar (Eds.): Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies. — John Wiley & Sons, Ltd. — 2016. — Pp. 99–128.
59. Gerasimenko, M. Prioritized centrally-controlled resource allocation in integrated multi-RAT HetNets / M. Gerasimenko, D. Moltchanov, R. Florea, et al. // IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring) / IEEE. — Glasgow, UK, 2015. — Pp. 1–7.
60. Ghosh, A. Heterogeneous cellular networks: From theory to practice / A. Ghosh, N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2012. — Vol. 50, no. 6. — Pp. 54–64.
61. Himayat, N. Multi-radio heterogeneous networks: Architectures and performance / N. Himayat, S. Yeh, A. Y. Panah, et al. // Proceedings of International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) / IEEE. — Honolulu, HI, USA, 2014. — Pp. 252–258.
62. Jensen, A. R. LTE UE Power Consumption Model: For System Level Energy and Performance Optimization / A. R. Jensen, M. Lauridsen, P. Mogensen, et al. // Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). — Quebec City, QC, Canada, 2012. — Pp. 1–5.

63. Korotky, S. K. Semi-empirical description and projections of internet traffic trends using a hyperbolic compound annual growth rate / S. K. Korotky // Bell Labs Technical Journal, vol. 18, no. 3, pp. 5–21, 2013. [Электронный ресурс]. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/6772725/metrics> (дата обращения: 13.10.2020)
64. Koudouridis, G. A Centralised Approach to Power On-Off Optimisation for Heterogeneous Networks Georgios / G. Koudouridis, G. Hui, P. Legg [Электронный ресурс]. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.477.2381&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 13.10.2020)
65. Lei, L. Optimal Cell Clustering and Activation for Energy Saving in Load-Coupled Wireless Networks. / L. Lei, D. Yuan, C. Keong Ho, S. Sun [Электронный ресурс]. URL <https://arxiv.org/pdf/1502.04344.pdf> (дата обращения: 14.10.2020)
66. Lempiainen, J. Radio interface system planning for GSM/GPRS/UMTS, / J. Lempiainen, M. Manninen // Kluwer Academic publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow/ 2004.
67. Li, G. Y. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues / G. Y. Li, Z. Xu, C. Xiong, et al. // IEEE Wireless Communications.— 2011. — Vol. 18, no. 6. — Pp. 28–35.
68. Mirahsan, M. HetHetNets: Heterogeneous traffic distribution in heterogeneous wireless cellular networks / M. Mirahsan, R. Schoenen, H. Yanikomeroğlu // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2015. — Vol. 33, no. 10.— Pp. 2252–2265.
69. Nakamura, T. Trends in small cell enhancements in LTE advanced / T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, et al. // IEEE Communications Magazine.— 2013. — Vol. 51, no. 2. — Pp. 98–105.
70. Navaratnarajah, S. Energy efficiency in heterogeneous wireless access networks / S. Navaratnarajah, A. Saeed, M. Dianati, et al. // IEEE Wireless Communications. — 2013. — Vol. 20, no. 5. — Pp. 37–43.

71. Peng, M. Self-configuration and self-optimization in LTE-advanced heterogeneous networks / M. Peng, D. Liang, Y. Wei, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2013. — Vol. 51, no. 5. — Pp. 36–45.
72. Pentikousis, K. In search of energy-efficient mobile networking / K. Pentikousis // IEEE Communications Magazine. — 2010. — Vol. 48, no. 1. — Pp. 95–103.
73. Raychaudhuri, D. Frontiers of wireless and mobile communications / D. Raychaudhuri, N. B. Mandayam // Proceedings of the IEEE. — 2012. — Vol. 100, no. 4. — Pp. 824–840.
74. Samdanis, K. Self-organized energy efficient cellular networks / K. Samdanis, D. Kutscher, M. Brunner // Conference: Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium [Электронный ресурс]. URL https://www.researchgate.net/publication/224206537_Self-Organized_Energy_Efficient_Cellular_Networks (дата обращения: 14.10.2020)
75. Samdanis, K. Self organized network management functions for energy efficient cellular urban infrastructures / K. Samdanis, T. Taleb, D. Kutscher, M. Brunner // Mobile Networks and Applications, , 2011. [Электронный ресурс]. URL <http://www.mosaic-lab.org/uploads/papers/e5def42f-943c-4998-bb44-6e466e225116.pdf> (дата обращения: 14.10.2020)
76. Singh, S. Offloading in heterogeneous networks: Modeling, analysis, and design insights / S. Singh, H. S. Dhillon, J. G. Andrews // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2013. — Vol. 12, no. 5. — Pp. 2484–2497.
77. Singh, S. On association cells in random heterogeneous networks / S. Singh, F. Baccelli, J. G. Andrews // IEEE Wireless Communications Letters. — 2014. — Vol. 3, no. 1. — Pp. 70–73.
78. Tombaz, S. Energy-and cost-efficient ultra-high-capacity wireless access / S. Tombaz, A. Vastberg, J. Zander // IEEE Wireless Communications. — 2011. — Vol. 18, no. 5. — Pp. 18–24.

79. Wang, L. Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks — A tutorial / L. Wang, G. G. S. Kuo // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2013. — Vol. 15, no. 1. — Pp. 271–292.

80. Wu, J. Energy-efficient base stations sleep mode techniques in green cellular networks: A survey / J. Wu, Y. Zhang, M. Zukerman, E. Yung // IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol. 17, No. 2, Second Quarter 2015 [Электронный ресурс]. URL <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7041163> (дата обращения: 14.10.2020)

81. Ye, Q. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks / Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, et al. // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2013. — Vol. 12, no. 6. — Pp. 2706–2716.

82. Yeh, S. Capacity and coverage enhancement in heterogeneous networks / S. Yeh, S. Talwar, G. Wu, et al. // IEEE Wireless Communications. — 2011.— Vol. 18, no. 3. — Pp. 32–38.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

20.11.2025 № 30-12/234
На № _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Дзюбы Андрея Всеволодовича на тему: «Совершенствование способов повышения эффективности гетерогенных сотовых сетей по критерию энергосбережения на основе методов системного анализа информационных процессов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Дзюбы А.В., а именно: рекомендации по минимизации общего потребления энергии подсистемой базовых станций гетерогенной сети LTE, рекомендации по оптимизации структуры гетерогенной сотовой сети LTE с учетом минимизации энергопотребления внедрены внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам: «Системы и сети радиосвязи» для студентов направления подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; «Математическое моделирование устройств и систем», «Теория построения инфокоммуникационных сетей и систем» для студентов направления подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Проректор по научно-педагогической работе
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебного отдела
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», профессор

Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой «Автоматика и телекоммуникации»
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», профессор

В.В. Турупалов

Соответствует оригиналу
Ученый секретарь





**МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ОПЕРАТОР СВЯЗИ»
(ГП «РОС»)**

Юридический адрес: ул. Артема, д. 169к, г. Донецк, 83121
Фактический адрес: ул. Марьянская, д. 1, г. Донецк, 83001; телефон: (062) 303-22-00
т/с 40602810820000000042 в ЦРБ ДНР, ИНН банка 51000050, БИК банка 310101001
e-mail: ros@phoenix-dnr.ru; https://phoenix-dnr.ru/ ИКЮЛ 51010289

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «Донецкий Национальный
Технический Университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Дзюбы Андрея Всеволодовича на тему: «Совершенствование способов повышения эффективности гетерогенных сотовых сетей по критерию энергосбережения на основе методов системного анализа информационных процессов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Дзюбы А.В., а именно: рекомендации по минимизации общего потребления электроэнергии подсистемой базовых станций гетерогенной сети LTE, рекомендации по оптимизации структуры гетерогенной сотовой сети LTE с учетом минимизации энергопотребления внедрены в производственный процесс ГП «РОС».

С уважением,
первый заместитель директора

