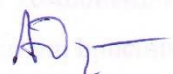


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2020

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Червинский Владимир Владимирович,
ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк), доцент
кафедры «Автоматика и телекоммуникации»

Официальные оппоненты: **Копп Вадим Яковлевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУВО «Севастопольский государственный
университет» (г. Севастополь),
профессор кафедры «Приборные системы и
автоматизация технологических процессов»

Бурлаева Екатерина Игоревна
кандидат технических наук,
ГУП ДНР «ЭНЕРГИЯ ДОНБАССА» (г. Донецк),
специалист 1 категории отдела сетевых сервисов
дирекции по информационным технологиям

Ведущая организация: **Государственное учреждение «Институт
проблем искусственного интеллекта»
(ГУ ИПИИ) (г. Донецк)**

Защита состоится «18» мая 2021 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДонНУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп.1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovnet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «___»_____2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент



Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Решить задачу качественного обслуживания абонентов в таких условиях могут гетерогенные сотовые сети четвертого поколения стандарта Long Term Evolution (LTE).

В последнее время вопросы потребления электроэнергии играют все более важную роль в сотовых сетях. Большинство предложенных решений по повышению энергетической эффективности сотовых сетей основаны на принципе исключения той части системы, которая потребляет наибольшее количество электроэнергии.

Такой подход особенно актуален для гетерогенных сотовых сетей LTE, развернутых 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 функционирования перспективной городской гетерогенной сотовой сети 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, М. Бруннера и других. В большинстве публикаций отмечают, что подсистема базовых станций сотовой сети потребляет наибольшее количество электроэнергии. В проведенных исследованиях предлагается несколько путей энергосбережения, однако все они 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 качества 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 метода 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».

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 научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 132 страниц 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе работы «Анализ проблемы энергосбережения в гетерогенных сетях LTE» проведен анализ развития гетерогенных сетей LTE и проблемы энергопотребления в них, формализована задача энергопотребления в гетерогенной сети LTE.

В сети LTE для обеспечения требуемого уровня соотношения сигнал/шум (SNR) конечные точки радиосвязи должны быть близки друг к другу. В сочетании с высокой плотностью населения в местах массового скопления это требует гетерогенной стратегии развертывания с использованием сот меньшего размера, размещенных в стратегических точках, для увеличения покрытия и качества связи мобильных макросетей. Такая стратегия предусматривает несколько типов сот, которые совместно развертываются для обеспечения высокоскоростного беспроводного доступа. Можно выделить несколько видов «малых» сот: макросоты, микросоты, пикосоты и фемтосоты. Пример развертывания гетерогенной сотовой сети LTE в условия крупного города приведен на рисунке 1.

Для разгрузки макро базовых станций (БС) требуется большое количество микро БС, устанавливаемых в местах наибольшего скопления людей.

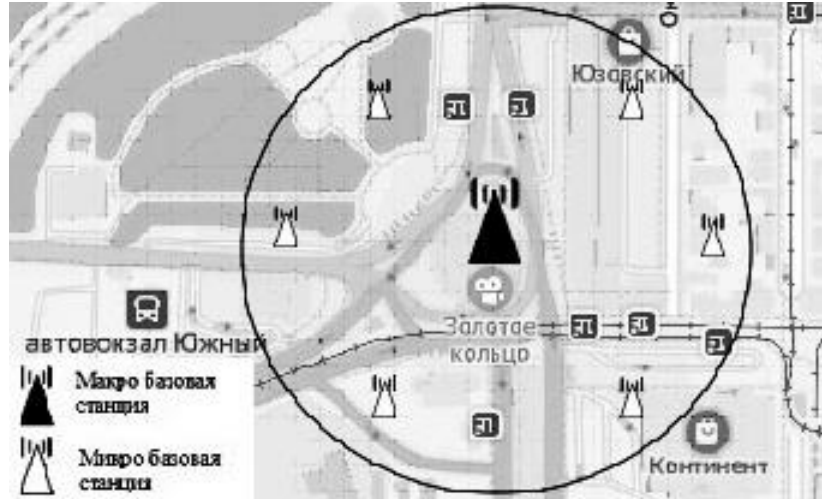


Рисунок 1 – Карта части крупного города с предполагаемым местом развертывания гетерогенной сети

Для гетерогенной сети LTE, состоящей из сот различного размера, общее потребление энергии является суммой потребления энергии в каждый интервал времени всеми её составляющими:

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

где E_{mac} – потребление энергии макро БС; E_{mic} – потребление энергии микро БС; E_{pic} – потребление энергии пико БС; E_{fem} – потребление энергии фемто БС; K – коэффициент диммирования; W_{adda} – дополнительное потребление энергии вспомогательным оборудованием макро БС; W_{addb} – дополнительное потребление энергии вспомогательным оборудованием микро БС; W_{per} – потребление энергии постоянно работающими системами вентиляции и кондиционирования; a, b, c, d – переменные, которые принимают значение 1, если станция включена, и значение 0, если станция выключена.

Во втором разделе работы «Исследование критериев выбора сот для условий перспективной гетерогенной сети LTE крупного города» рассматриваются четыре основных критерия выбора сот:

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

При выборе сот на основе расстояния, пользовательское оборудование подключается к конкретной микро БС, когда оно находится в пределах заданного географического расстояния от микро БС независимо от расстояния до макро БС и от SNR получаемого сигнала.

При выборе сот по уровню сигнал/шум мобильные устройства подключаются к БС, которая имеет самый высокий уровень SNR, независимо от расстояния между абонентским устройством и БС. Этот критерий дает максимально возможную достижимую скорость передачи данных. Однако, при этом возникают проблемы перераспределения пользователей между макро и микро БС, которые приводят к перегрузке макро БС.

Критерий выбора сот на основе ширины полосы пропускания позволяет более равномерно распределять доступный ресурс в сети и создает больше возможностей для минимизации трафика в макро БС и снижения энергопотребления.

Цель критерия выбора сот по полосе пропускания состоит в том, чтобы переместить абонентские устройства из перегруженных БС в менее нагруженные, получая выгоду из более широкой доступной полосы пропускания и создавая возможности для макро БС не работать на полную мощность.

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

Последние два критерия влияют на минимизацию потребления энергии в сети доступа. В обоих критериях осуществляется управление трафиком так, чтобы обеспечить максимальную возможность снижения энергопотребления в БС при сохранении качества обслуживания для пользователей.

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 модельного анализа используется участок сети, содержащий одну соту, охватываемую одной макро БС с радиусом покрытия 680 метров и шестью микро БС, развернутыми на расстоянии в 450-550 метрах от макро БС.

Общее число пользователей изменяется от 200 до 2400. При этом предполагается, что каждое место с высоким спросом генерирует дополнительные 10% пользователей.

Результаты моделирования представлены на рисунках 2, 3. На рисунке 2 приведен график процентного изменения количества пользователей, подключенных к микро БС по отношению к общему количеству активных пользователей соты. На рисунке 3 приведен график зависимости средней достижимой скорости передачи данных от количества активных пользователей для соты в целом.

Хотя средняя достижимая скорость передачи данных является самой высокой для критерия по SNR, большой процент пользователей, подключенных к макро БС, из-за нехватки доступной полосы пропускания остается 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 по сравнению с критерием по SNR.

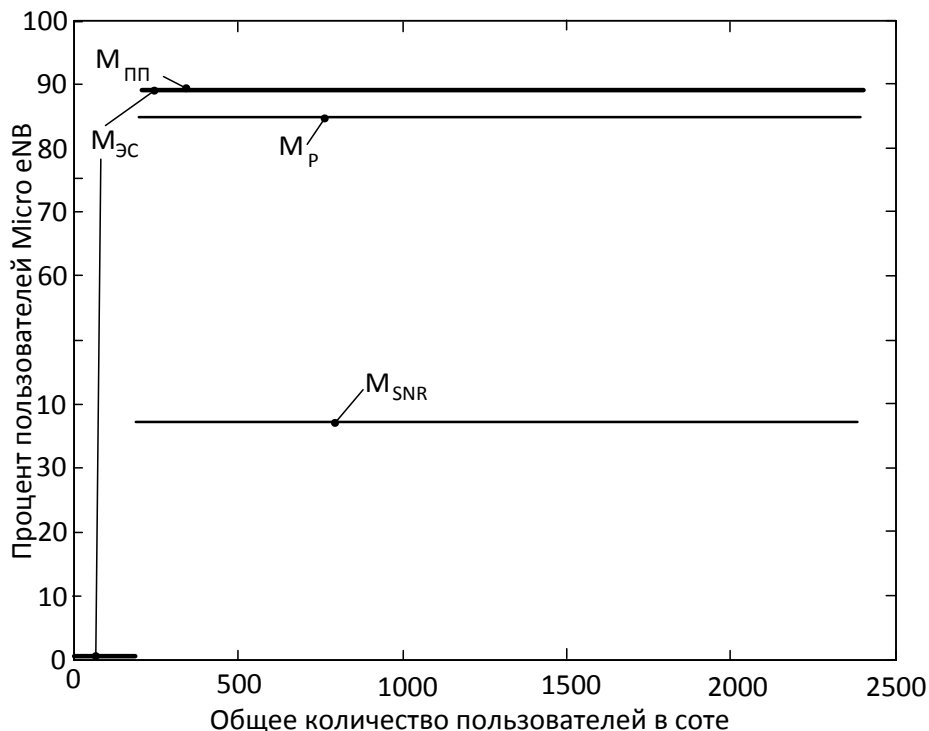


Рисунок 2 – Процент пользователей микро БС для различных методов выбора сот

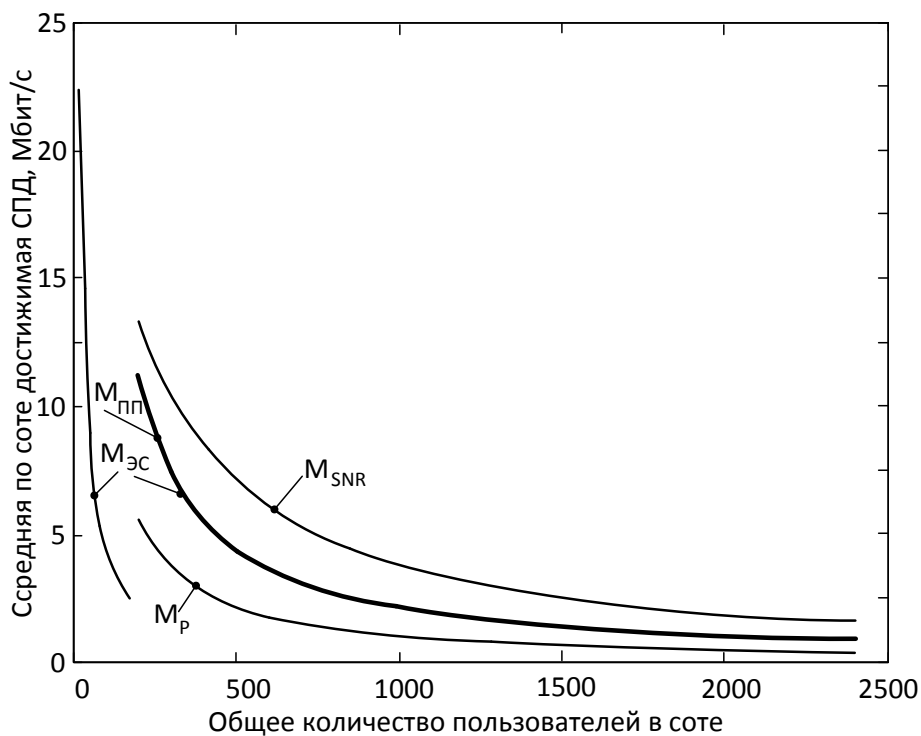


Рисунок 3 – Средняя достижимая скорость передачи данных для пользователей всей соты

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

В третьем разделе работы «Оптимизация сокращения энергопотребления в гетерогенной сети LTE для условий крупного города» рассматривается вопрос снижения энергопотребления в гетерогенной сотовой сети LTE на основе отключения микро БС и оптимизации мощности передачи макро БС в соответствии с текущим числом их пользователей.

Большая часть потребления энергии в гетерогенной сотовой сети LTE приходится на макро БС. В них 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. Следовательно, макро БС может передавать сигнал на меньшей мощности при поддержке требуемого качества обслуживания.

Рассмотрим потребляемую каждой БС энергию в момент времени t . Обозначим через N_t^{abmic} и N_t^{abmac} количество подключенных пользователей соответственно к микро и макро БС, являющееся результатом выбора соты по одному из критериев. Предположим, что микро БС 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 БС постоянно потребляет мощность P^{micro} для приема/передачи. Также вспомогательное оборудование микро БС потребляет дополнительную мощность как процент от P^{micro} для поддержки оборудования независимо от уровня спроса.

В результате, общая потребляемая мощность всеми микро БС составит:

$$E_{bs} = \sum_{j=1}^{N_{micro}} b_j \cdot (1 + S_{addb}) \cdot P^{micro}, \quad (2)$$

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

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

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

$$P^{macro} = [30, 31, 32, \dots, \max P^{macro}], \text{ dBm}. \quad (3)$$

Благодаря увеличенной доступной пропускной способности для пользователей в периоды низкой нагрузки, мощность передачи макро БС можно снизить, при этом для пользователей достигается требуемая скорость передачи данных. Базовая скорость передачи данных задается оператором сотовой связи. Для определения текущего состояния макро БС в момент

времени t создается вектор p_t , содержащий значения долей от максимальной мощности, потребляемой каждой макро БС в момент времени t при определенном уровне диммирования.

Таким образом, мощность макро БС, требуемая для передачи в момент времени t , равна $p_t \cdot P^{\text{macro}}$. 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 БС передают сигнал, $a_t = 1$, в то время как кондиционирование воздуха необходимо в любое время.

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

$$Z = \min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N^{\text{micro}}} b_t^j \cdot (1 + S_{\text{addb}}) \cdot P^{\text{micro}} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N^{\text{macro}}} a_t^i \cdot [P^{\text{macro}}] \cdot [p_t^i]^T + \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N^{\text{macro}}} a_t^i \cdot S_{\text{adda}} \cdot P^{\text{micro}} + T \cdot N_{\text{macro}} \cdot S_{\text{per}} \cdot P^{\text{macro}} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где S_{adda} – процент дополнительной мощности для вспомогательного оборудования макро базовой станции; S_{per} – доля потребления энергии дополнительной вентиляцией и системой кондиционирования воздуха.

Ограничения:

$$N_t^{\text{abmic}} \cdot b_t \geq N_t^{\text{abmic}} \quad (5)$$

$$N_t^{\text{abmac}} \cdot a_t \geq N_t^{\text{abmac}} \quad (6)$$

$$\text{BaseC} \geq \text{ExpC} \quad (7)$$

$$a_t, b_t \in \{0,1\}, \quad (8)$$

где BaseC – требуемая скорость передачи; ExpC – достижимая скорость передачи.

Уравнение (4) включает энергопотребление: микро БС, передачи/приема макро БС, вспомогательного оборудования макро БС и системы вентиляции и охлаждения макро БС. Ограничения (5) и (6) гарантируют включение БС при подключении пользователей. Ограничение (7) гарантирует, что достижимая скорость передачи данных ExpC будет не менее требуемой BaseC .

Для решения подобных задач системного анализа используют эффективный алгоритм – симплексный метод.

Для оценки полученной модели оптимизации энергопотребления проведено имитационное моделирование участка гетерогенной сети для центральной части типового крупного города. Макро БС работает на частоте

1800 МГц и способна передавать сигнал максимум в 46 дБм. Мощность передачи макро БС может варьироваться в зависимости от нагрузки $N^{abmacro}$:

$$P^{macro} = [37, 38, 39, \dots, 46] \text{dBm}. \quad (9)$$

Микро БС работают на частотной полосе 2600 МГц и передают сигнал 30 дБм, когда они активны.

Рисунок 4 отражает общее потребление энергии в процентах от полной потребляемой энергии при использовании различных критериев выбора сот. Наилучшим способом энергопотребления для рассматриваемых условий является предложенный метод энергосбережения с диммированием мощности макро БС.

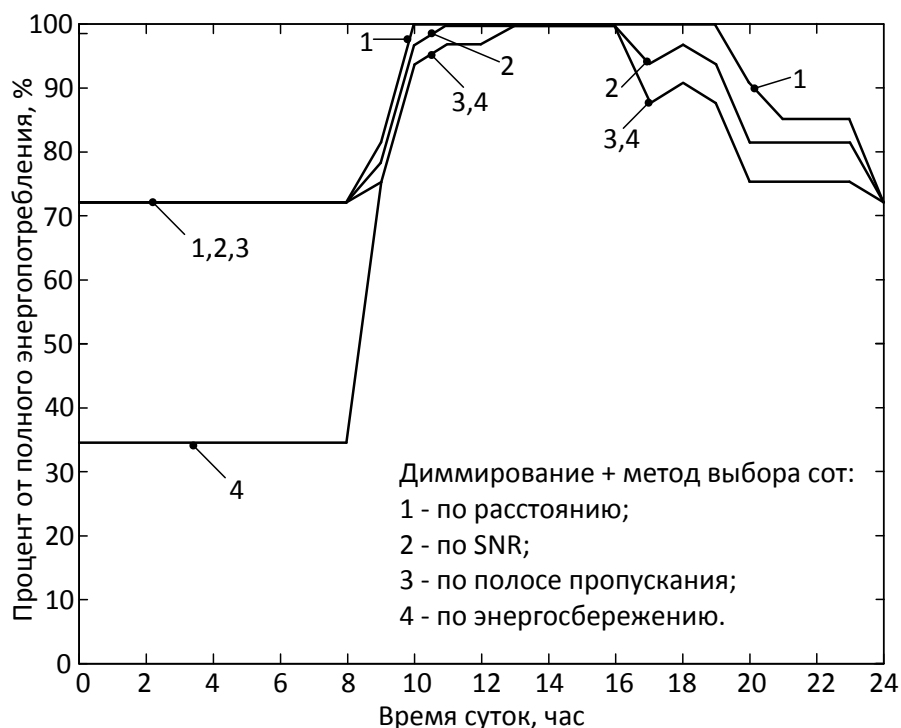


Рисунок 4 – Общее потребление энергии в процентах от полной потребляемой энергии при использовании различных критериев выбора сот

На рисунке 5 представлены графики изменения достижимой скорости передачи данных для пользователей макро БС. Минимизированная мощность передачи макро БС влияет только на пользователей, подключенных к ней. При использовании различных критериев выбора сот уменьшение энергопотребления снижает скорость передачи данных пользователей. В периоды с низкой нагрузкой это особенно заметно, поскольку оборудование работает на минимуме мощности. Однако скорость передачи данных в эти периоды 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.

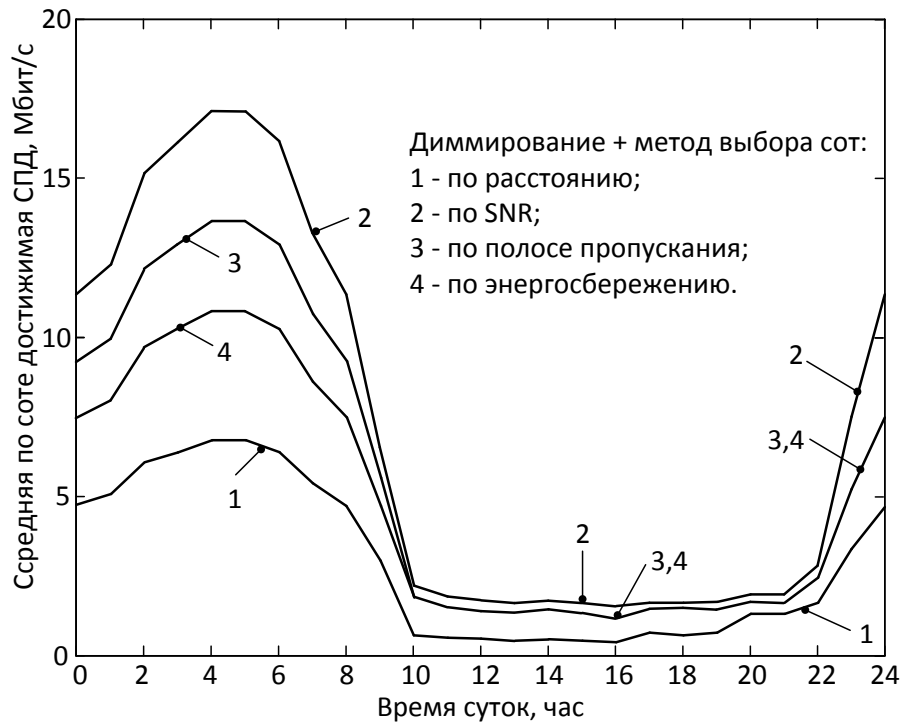


Рисунок 5 – Достижимая скорость передачи данных пользователями макро базовой станции при использовании различных критериев выбора сот в сочетании с диммированием мощности макро БС

Численные результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – 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

Таким образом, можно значительно снизить общее потребление энергии с помощью предлагаемой методики оптимизации энергопотребления на основе пошагового диммирования в сочетании с критерием выбора сот по энергопотреблению.

В четвёртом разделе работы «Методика оптимизации структуры гетерогенной сети LTE с учетом минимизации энергопотребления» рассмотрены вопросы планирования структуры гетерогенной сотовой сети для условий крупного города с учетом минимизации капитальных затрат и обеспечения качества обслуживания абонентов, приведены результаты вычислительного эксперимента, рассчитан экономический эффект от применения предложенной методики.

Объектом развертывания сети выступает городская территория, состоящая из зон обслуживания с различными типами трафика.

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 БС, где $mbs \in [1, N^{mbs}]$ и ts точек потенциального скопления абонентов, где $ts \in [1, N^{ts}]$. Пусть $k1^{mbs} = 1$, если макро БС развернута в потенциальном месте расположения mbs . Исходим из того, что можно установить микро БС в любой тестовой точке. Пусть $k2^{tt} = 1$, если микро БС развернута в тестовой точке tt . Каждая тестовая точка должна находиться в зоне покрытия как минимум одной макро БС. 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. Точка потенциального скопления абонентов ts должна находиться в зоне покрытия как минимум одной микро БС. Пусть $k4^{ts, tt} = 1$, если точка потенциального скопления абонентов ts находится в зоне покрытия микро БС из тестовой точки tt и $k4^{ts, tt} = 0$ в противном случае. Чтобы учесть зависимость между местоположениями точки потенциального скопления абонентов и микро БС, в выражение включено предполагаемое расстояние между ними $L2^{ts, tt}$. Пусть стоимость развертывания равна C^{mac} для макро БС и C^{mic} для микро БС. Пусть стоимость транспортной сети между макро и микро БС равна $c1$, штрафная стоимость удаления микро БС от точек скопления абонентов равна $c2$.

Разделим сложную задачу расположения БС с минимальными капитальными затратами в масштабах города на две части: планирование сети, основанное на обеспечении полного покрытия, и планирование сети, основанное на качестве обслуживания. Задача оптимизации расположения макро БС, основанная на покрытии, формулируется следующим образом:

$$Z1 = \min \left\{ \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} C^{mac} k1^{mbs} \right\}, \quad (10)$$

где

$$\sum_{tb=1}^{N^{tt}} k3^{tt, mbs} k1^{mbs} \geq 1; \quad (11)$$

$$L1^{tt, mbs} k3^{tt, mbs} k1^{mbs} \leq R^{mac}; \quad (12)$$

$$k1^{mbs} \in \{0, 1\}; \quad (13)$$

$$k3^{tt, mbs} \in \{0, 1\}. \quad (14)$$

$L1^{tt,mbs}$ определяет расстояние между потенциальным местоположением макро БС mbs и тестовой точкой tt . Условие (11) обеспечивает наличие как минимум одной макро БС, покрывающей каждую тестовую точку, поскольку макро БС должны гарантировать полное покрытие. Условие (12) указывает на то, что тестовые точки tt и точки потенциального скопления абонентов ts должны находиться в зоне покрытия соответствующих макро БС.

Задача оптимизации, основанная на качестве обслуживания, формулируется следующим образом:

$$Z2 = \min \left\{ \sum_{tt=1}^{N^{tt}} C^{mic} k2^{tt} + \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c1L1^{mbs,tt} k1^{mbs} k2^{tt} + \sum_{ts=1}^{N^{ts}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c2L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt} \right\}, \quad (15)$$

где

$$\sum_{ts=1}^{N^{ts}} k4^{ts,tt} k2^{tt} \geq 1; \quad (16)$$

$$L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt} \leq R^{mic}; \quad (17)$$

$$k2^{tt} \in \{0,1\}; \quad (18)$$

$$k4^{ts,tt} \in \{0,1\}. \quad (19)$$

Условие (16) гарантирует, что микро базовые станции покрывают все точки потенциального скопления абонентов. Условие (17) указывает на то, что тестовые точки tt и точки потенциального скопления абонентов ts должны находиться в зоне покрытия соответствующих микро БС.

Для решения задачи оптимизации (10) и (15) предлагается использовать симплекс-метод. В результате, получим структуру гетерогенной сети, применяя к которой критерий выбора сот по энергосбережению и пошаговое диммирование, можно достичь существенного снижения суммарного энергопотребления подсистемой БС.

Рассмотрим территорию центральной части крупного города 9 км на 4 км, разделённую на пять типов зон по виду сервиса: нежилые, жилые, придорожные, развлекательные, деловые, представленную на рисунке 6.

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 с разной нагрузкой.

Результатом решения задач (10) и (15) являются 20 макро и 111 микро БС. На рисунке 7 представлено их расположение.

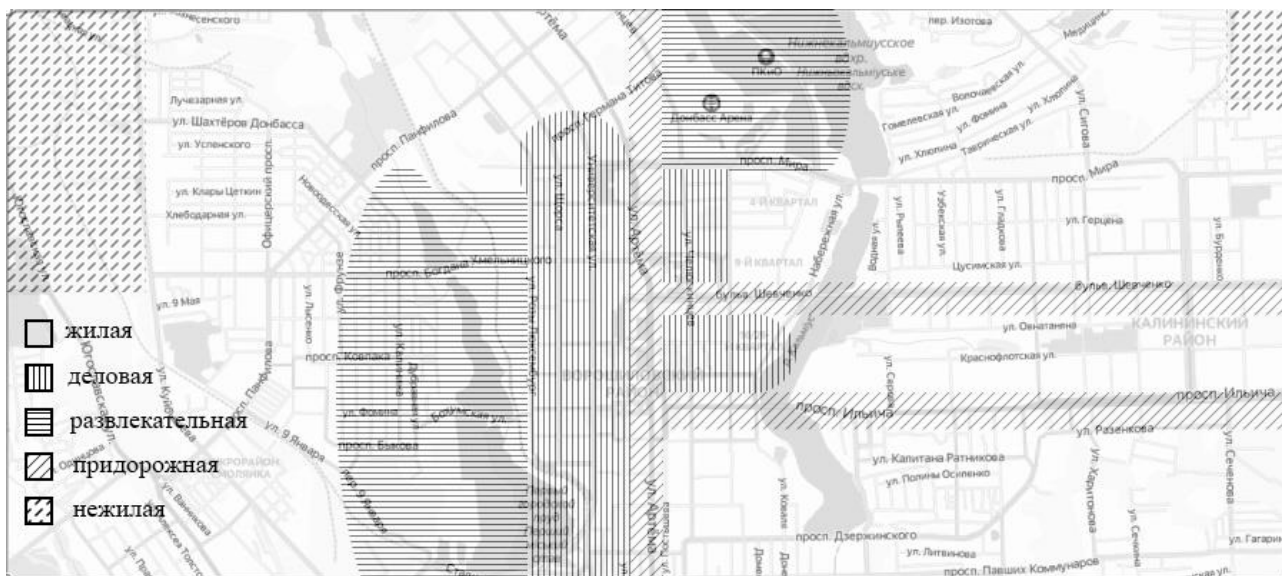


Рисунок 6 – Разделение городского района на зоны обслуживания

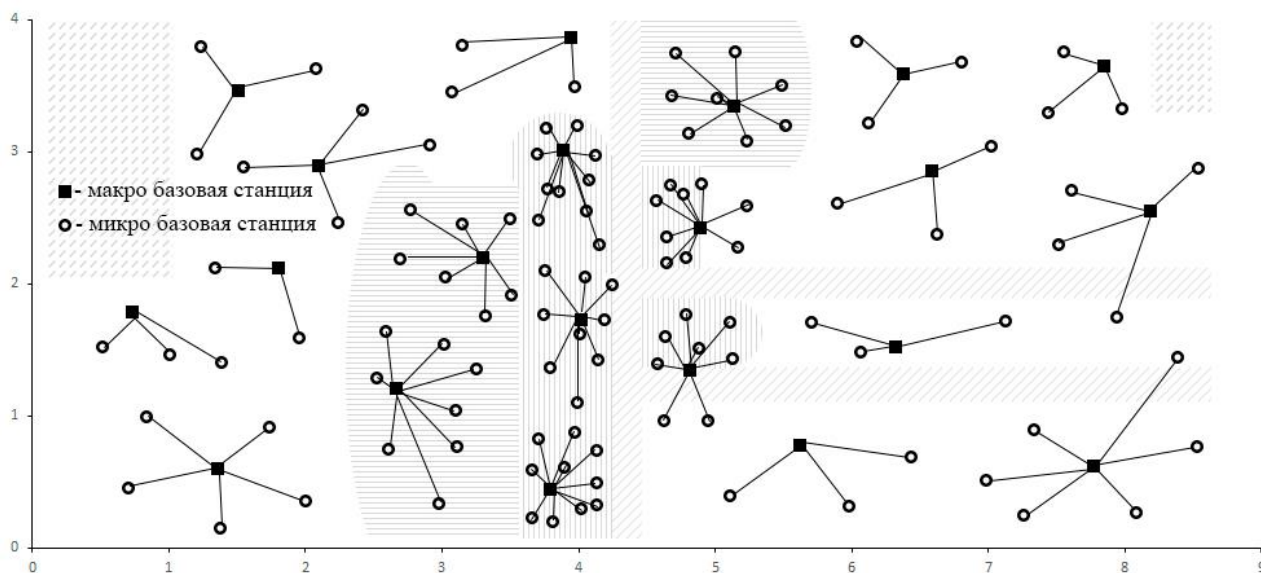


Рисунок 7 – Вариант развертывания гетерогенной сети LTE

Для полученной структуры сети сравним энергопотребление для трех сочетаний критерия выбора сот и оптимизации энергосбережения (Таблица 2).

Таблица 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 результатов моделирования использование критерия выбора сот по энергосбережению в сочетании с пошаговым диммированием позволяет снизить энергозатраты в наибольшей мере до 74,38% от общего потребления.

Проведена оценка операционных расходов на функционирование рассмотренной гетерогенной сотовой сети LTE, исходя из того, что срок ее службы составляет 10 лет. Без использования методов энергосбережения они составят 32 697 357 рос. рублей.

Использование предложенных методик и рекомендаций снизит операционные расходы до 24 320 294 рос. рублей

Предложенные решения позволят сэкономить 8 377 063 российских рублей за 10 лет.

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 основных 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК ДНР:

1. **Дзюба, А.В.** Задача оптимизации энергопотребления гетерогенной сетью LTE в условиях крупного города / **Дзюба А.В.**, Червинский В.В. // Научный журнал «Информатика и кибернетика». – 2019 – №4 (18). – С. 57–64.

2. 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. – 2020. – Вып. 56. – С. 31–42.

3. **Дзюба, А.В.** Минимизация энергопотребления в гетерогенной сети LTE для условий крупного города / **Дзюба А.В.** // Научный журнал «Вестник Академии гражданской защиты». – 2020. – Вып. 1 (21). – С. 132–139.

4. **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.

5. **Дзюба, А.В.** Практическое использование метода оптимизации структуры гетерогенной сети LTE с учетом минимизации энергопотребления. / **Дзюба А.В.** // Научный журнал «Информатика и кибернетика». – 2020 - №3 (21). – С. 5–12.

- в других изданиях:

6. Максимов, А.А. Исследование передачи данных реального времени в мобильных сетях четвертого поколения / Максимов А.А., **Дзюба А.В.**, Червинский В.В. // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сборник научных трудов XX международной научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 26-28 мая 2020 г. - Донецк: ДОННТУ, 2020. – С. 48–51.

7. Трунова, А.Д. Формализация задачи снижения энергопотребления базовыми станциями в сотовой сети LTE / Трунова А.Д., Светличная В.А., **Дзюба А.В.** // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование в рамках VI форума «Инновационные перспективы Донбасса» (ИУСМКМ – 2020): XI Международная научно-техническая конференция, 27-28 мая 2020, г. Донецк: / Донец. национал. техн. ун-т; редкол. Ю.К. Орлов и др. – Донецк: ДОННТУ, 2020. – С. 243–247.

Личный вклад соискателя в публикациях: [1] – установлено, что основой для снижения энергопотребления является корректное определение актуального метода выбора сот в гетерогенных сетях LTE в зависимости от количество активных абонентов, их распределения по территории макросоты и запрашиваемых ими услуг; [2] – определены достоинства и недостатки критериев выбора сот, оценена возможность их использования для построения системы эффективного управления гетерогенной сетью LTE; [6] – исследование процедуры генерирования сигналов LTE-технологии в нисходящем и восходящем каналах связи; [7] – обоснована актуальность создания компьютеризированной системы, управляющей подключением БС сотовой сети.

АННОТАЦИЯ

Дзюба А.В. Совершенствование способов повышения эффективности гетерогенных сотовых сетей по критерию энергосбережения на основе методов системного анализа информационных процессов. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки). – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2020.

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение 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.

Для решения поставленной задачи определены факторы, влияющие на системные показатели эффективности функционирования гетерогенных сотовых сетей LTE. Разработана математическая модель информационных и технологических процессов в гетерогенных сотовых сетях LTE, влияющих на показатели энергопотребления базовых станций и на качество обслуживания абонентов. Разработан и обоснован критерий оптимизации функционирования гетерогенной сотовой сети LTE с точки зрения минимизации энергопотребления с учетом обеспечения заданного качества обслуживания. Разработан 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.

Ключевые слова: гетерогенная сотовая сеть, качество, абонент, базовая станция, оптимизация, энергопотребление, сота, анализ, метод.

ABSTRACT

Dziuba A.V. Improvement of approaches to increase the efficiency of heterogeneous cellular networks by the criteria of energy saving based on the methods of system analysis of information processes.

Ph.D. (Candidate's) Thesis in Engineering Science by specialty 05.13.01 - System analysis, management and information processing (by industry) (technical sciences) – STATE HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENT “DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY”, Donetsk, 2020.

This thesis is devoted to theoretical justification and solution to the scientific and practical problem of increasing the efficiency of the functioning of a promising urban heterogeneous cellular LTE network is given on the basis of optimizing energy consumption by base stations by analyzing their load, determining their shutdown and dimming in combination with updating the criterion for selecting hundreds of subscriber equipment.

To solve this problem, the factors influencing the system performance indicators of heterogeneous cellular LTE networks are determined. Mathematical models of information and technological processes in heterogeneous cellular LTE networks have been developed, which affect the indicators of power consumption of base stations and the quality of service for subscribers. A criteria for optimizing the functioning of a heterogeneous cellular LTE network has been developed and substantiated from the point of view of minimizing energy consumption, taking into account the provision of a given quality of service. A method for planning a heterogeneous cellular network LTE has been developed based on the criteria of structural optimization, taking into account the density of subscribers and types of service areas while ensuring a given level of quality of service.

Keywords: heterogeneous cellular network, quality, user, base station, optimization, energy consumption, cell, analysis, method.

Подписано в печать 26.02.2021. Формат 60×84 1/16.
Усл.печ.л. 1,0. Печать лазерная. Бумага 80г./м2.
Тираж 100 экз. Заказ № 410.

Отпечатано в ФЛП Новаковская Л.П.
г. Донецк, ул. Университетская, 34.
тел.: (062) 334-0-100.
Свидетельство о регистрации ДНР серия АА01 № 18023
от 27 октября 2014 г.