

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Семёновой Ольги Валерьевны

на диссертационную работу Голос Елизаветы Сергеевны на тему «Построение вероятностных моделей микро- и макромобильности для анализа энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио»», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

### **Актуальность темы диссертационной работы:**

Стандарт 5G «Новое радио» и особенно миллиметровый диапазон частот, выводит требования к математическому моделированию систем связи на новый уровень сложности. В отличие от сетей предыдущих поколений, где доминировали задачи анализа трафика и распределения ресурсов, здесь центральной становится проблема энергоэффективности пользовательских устройств в условиях стохастической динамики радиоканала.

Использование узких лучей фазированных антенных решёток для компенсации высокого затухания приводит к тому, что соединение становится критически зависимым от направления антенн и наличия прямой видимости. При этом даже малые возмущения — поворот устройства в руке или кратковременное появление препятствия — вызывают рассогласование лучей и требуют повторного выполнения энергозатратных процедур синхронизации. С формальной точки зрения, речь идёт о случайных процессах с быстрой и медленной компонентами, совместное влияние которых на энергопотребление ранее не описывалось аналитически.

Консорциум 3GPP предложил два класса решений: мультисвязность (одновременное соединение с несколькими базовыми станциями для повышения надёжности) и механизмы энергосбережения (механизм прерывистого приема, сигнал пробуждения, релаксация управления радиоресурсами). Однако, как показывают исследования, мультисвязность увеличивает энергопотребление практически линейно с числом резервных каналов, а эффективность механизмов энергосбережения в условиях подвижности остаётся не оценённой. Существующий разрыв между стандартизированными механизмами и их практической применимостью напрямую обусловлен отсутствием вероятностных моделей,

комплексно описывающих взаимодействие микро- и макромобильности, мультисвязности и энергосберегающих технологий.

Таким образом, тема диссертационной работы Голос Елизаветы Сергеевны «Построение вероятностных моделей микро- и макромобильности для анализа энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио»», а также ее цель, которая заключается в разработке математических моделей для анализа и расчета показателей эффективности механизмов макро- и микромобильности, и энергоэффективности сети крайне актуальны и полностью соответствуют специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика».

### **Содержание диссертации**

Текст диссертации включает в себя введение, основную часть из трех глав и заключение. Диссертация включает в себя список литературы из 139 библиографических ссылок. Работа изложена на 149 страницах текста, содержит 5 приложений на 10 страницах.

Исследование начато с анализа базовых факторов, влияющих на качество связи, при построении базовых моделей в главе 1, затем в главе 2 разработана модель мультисвязности степени 2, т.н. «двойное подключение», и наконец, в главе 3 исследованы методы энергосбережения, при этом ключевым результатом каждой главы является аналитическое выражение для функции распределения длительности непрерывного соединения пользовательского устройства с сетью, а также распределения интервалов, из которых складывается эта случайная величина.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, а также указаны научная новизна, теоретическая и практическая ценность данной работы. **В главе 1** подробно рассмотрены особенности работы сетей 5G в миллиметровом диапазоне FR2, включая влияние микро- и макромобильности на длительность непрерывного соединения пользовательского устройства с сетью. Для количественной оценки этих эффектов предложены аналитические модели: алгоритм расчёта параметров микромобильности и метод оценки длительности интервала до макромобильности с учётом случайного расположения блокаторов.

**В главе 2** для анализа двойного подключения разработана трёхуровневая модель в виде поглощающих цепей Маркова, описывающая переключение между приложениями, взаимодействие с основной и резервной базовыми станциями, а также работу механизма прерывистого приема. Это позволило провести сравнение трёх сценариев двойного подключения: FR2/FR2, FR2/FR1 и FR2/LTE. Численный

анализ проведен для нескольких классов приложений, различающихся скоростями микромобильности и требованиями к скорости предоставления услуги.

**В главе 3** для подвижных пользовательских устройств RedCap и неподвижных блокаторов построена модель, описывающая перемещение пользователя и изменение ориентации пользовательского устройства в виде уравнений диффузии. Для анализа комбинаций трёх механизмов энергосбережения (механизм прерывистого приема, сигнал пробуждения, релаксация управления радиоресурсами) построена двухуровневая цепь Маркова, позволяющая .

### **Достоверность и новизна результатов диссертации**

Достоверность результатов обеспечивается несколькими факторами. Все доказательства опираются на апробированные методы теории массового обслуживания, марковских случайных процессов и стохастической геометрии. Предложенные комбинации механизмов энергосбережения не являются произвольными, а базируются на обобщении известных решений для сетей 4G и 5G. Частные случаи разработанных моделей качественно совпадают с классическими результатами теории случайных процессов, а количественные оценки — с опубликованными данными имитационного моделирования. Новизна заключается в разработке многоуровневых цепей Маркова, позволяющих одновременно учитывать микро- и макромобильность, внутри- и межсетевую мультисвязность, а также комбинации механизмов энергосбережения для анализа четырёх показателей энергоэффективности пользовательского устройства. На основе трехуровневой модели впервые выполнен сравнительный анализ трёх сценариев двойного подключения с базовыми станциями технологий FR2/FR2, FR2/FR1 и FR2/LTE. На основе двухуровневой модели впервые проведён сравнительный анализ комбинаций механизмов прерывистого приема, сигнал пробуждения, релаксация управления радиоресурсами.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Все научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, являются строго обоснованными. Логика доказательств выстроена последовательно: от базовых моделей микро- и макромобильности в главе 1 до многоуровневых цепей Маркова в главах 2 и 3. Каждое утверждение подкреплено либо аналитическим выводом, либо ссылкой на известные результаты. Численные эксперименты подтверждены верификацией с помощью имитационного моделирования и воспроизводимы. Сформулированные выводы и практические

рекомендации могут служить основой для оптимизации параметров сетей подвижной связи.

### **Ценность для науки и практики результатов работы**

Результаты диссертации представляют как теоретический, так и прикладной интерес. С практической точки зрения, они могут быть использованы при проектировании сетей связи в условиях ограниченных энергетических ресурсов и жёстких требований к качеству обслуживания. Разработанные модели позволяют оптимизировать параметры двойного подключения и комбинации механизмов энергосбережения, что актуально для телекоммуникационных компаний и интернет-провайдеров. Теоретическая значимость работы заключается в создании математического аппарата, который может служить основой для разработки новых алгоритмов управления сетью доступа NR и методов анализа энергоэффективности в сетях 5G и далее.

### **Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

Результаты исследования представлены в 7 публикациях, в том числе в 3 работах, опубликованных в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, 1 работе в журнале из списка ВАК РФ. По теме диссертации автором получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат диссертации точно передает ключевые положения исследования и соответствует всем предъявляемым требованиям.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Необходимо было бы более подробно обсудить вопрос о выборе распределения при моделировании длительности интервала до наступления события микромобильности (глава 1) и насколько в данном случае обоснован выбор экспоненциального распределения.

2. Также следовало бы отдельно рассмотреть сценарий с высокой плотностью блокаторов ( $>0.5$ ) для модели макромобильности (глава 1).
3. Интересным было бы сравнение показателей энергоэффективности построенных в главе 2 модели двойного подключения и в главе 3 модели комбинации механизмов энергосбережения с показателями систем без учёта микро- и макромобильности.
4. Следовало бы также привести матрицу  $Q\_multi$  (стр. 48, 50) в явном виде.
5. В утверждении 2.1 вводится  $\lambda\_observ$ , однако не указано, какое значение эта величина принимает в численном эксперименте главы 2.
6. В диссертационной работе также присутствует ряд неточностей и опечаток. Например, на стр. 10, формула (1.14) в знаменателе лишняя скобка, на стр. 47  $i$  принимает значение до  $N$ , а не до  $3N$ .

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и численного эксперимента, не снижают теоретической и практической значимости полученных результатов, а также общую положительную оценку выполненной диссертационной работы.

## **Заключение**

Диссертационное исследование Голос Елизаветы Сергеевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи, имеющей важное значение для разработки математической модели состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде поглощающей цепи Маркова, позволяющей оценить энергопотребление, энергоэффективность и время работы батареи пользовательского устройства при применении механизма прерывистого приема и мультисвязности с двойным подключением в зависимости от плотности блокаторов и базовых станций для трех сценариев внутрисетевого и межсетевого подключения и типов приложений.

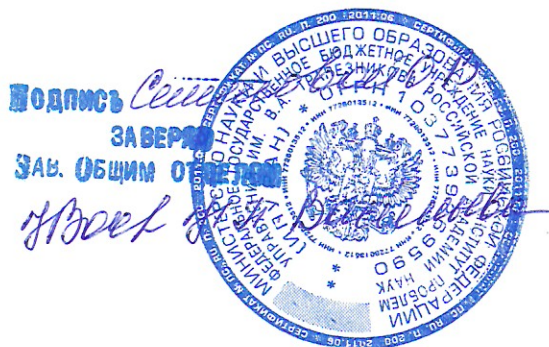
Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук согласно пункта 2.2 раздела II Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утверждённого Учёным советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а её автор, Голос Елизавета Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

## Официальный оппонент

Семёнова Ольга Валерьевна, доктор физико-математических наук (05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), ведущий научный сотрудник лаборатории телекоммуникационных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук».

«02» июня 2026 г.

 Семёнова Ольга Валерьевна



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук»

Адрес: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 2

Тел. +7 (495) 334-89-10, e-mail: dan@ipu.ru

Страница в интернете: <https://www.ipu.ru>