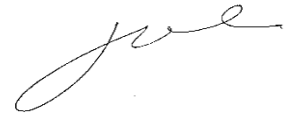


На правах рукописи



**Артур Джозеф Квеку**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ  
MAC- И ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ СЕТЕЙ WiMAX**

Специальность 05.12.13 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара- 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (ФГБОУ ВО СПбГУТ)

**Научный руководитель:** **Коротин Владимир Евгеньевич**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Елисеев Сергей Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой радиосвязи, радиовещания и телевидения  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики», г. Самара

**Попов Евгений Александрович**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
радиотехнических и телекоммуникационных систем  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет Петра Великого»,  
г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** Федеральное Государственное унитарное предприятие  
«Научно-Исследовательский Институт Радио» (ФГУП  
НИИР), г. Москва

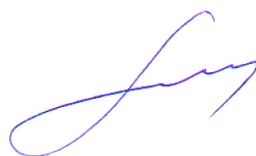
Защита состоится 10 июня 2016 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО ПГУТИ [www.psuti.ru/science/diss-ob](http://www.psuti.ru/science/diss-ob)

Автореферат разослан

«\_\_\_» апреля 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 219.003.02  
доктор технических наук, профессор



А.И. Тяжев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Интенсивное развитие беспроводных сетей ставит задачи увеличения их производительности, в том числе разработки алгоритмов функционирования физического и MAC-слоев, обеспечивающих своевременную и надежную передачу информации, уменьшающих время на выделение ресурсов абонентским станциям и позволяющих эффективно управлять их мощностью и распределять пропускную способность сети между ними при соблюдении регламентированного уровня качества обслуживания различных видов трафика. Механизмы распределения ресурсов в сетях WiMAX становятся критически важными для обеспечения требуемого качества обслуживания и надежности функционирования этих сетей. Сети WiMAX, функционирующие на основе рекомендаций IEEE 802.16, реализуют механизм обеспечения, требуемого для различных видов трафика качества обслуживания путём предоставления определённого ресурса – полосы передачи – в соответствии с запросом абонентской станции. Для реализации механизма запроса полосы стандартом предусмотрен конкретный временной интервал в кадре восходящей связи, который может варьироваться по длительности, и величина которого отражается на общей длительности слотов для передачи пользовательских данных. Поэтому задача поиска эффективных методов управления величиной интервала запроса полосы и разработка алгоритма разделения частотного ресурса между двумя операторами сетей WiMAX представляется актуальной.

**Степень разработанности темы.** Вопросы стандартизации технических требований к качеству услуг в существующих и перспективных сетях связи разрабатывает технический комитет TC STQ. Основная задача этого комитета состоит в координации деятельности технических комитетов ETS по вопросам качества передачи речи между конечными пользователями. Комитет должен содействовать разработке оборудования передачи речи в существующих и перспективных сетях связи. Комитет был сформирован в 1997 году. Изначально он создавался как центр экспертизы по вопросам качества речи, однако сфера его деятельности была расширена за счет включения большего количества базовых вопросов, имеющих отношение к качеству услуг связи. Однако далеко не все вопросы повышения качества услуг связи решены этим комитетом, таких, как поиск эффективных методов управления величиной интервала запроса полосы и разработка алгоритма разделения частотного ресурса между операторами сетей WiMAX остается нерешенной.

**Цель диссертационной работы** состоит в разработке и исследовании новых алгоритмов повышения качества услуг связи (QoS) в беспроводных системах, которые уменьшат время доступа абонентской станции к диапазону сети.

### **Задачи диссертационной работы.**

1. Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ того, как QoS поддерживается в различных системах беспроводной связи.
2. На основе анализа существующих методов повышения QoS в беспроводных системах решается задача разработки математической модели повышения QoS в MAC-слое и алгоритма повышения QoS в физическом (PHY) слое сетей WiMAX.
3. На основе математической модели повышения QoS необходимо разработать алгоритм выбора энергоэффективных маршрутов с учетом вариации расстояний между пользователем и базовыми станциями собственной и сторонней сети.

**Научная новизна работы состоит в:**

- использовании математической модели вместо традиционной case- модели при решении задачи поиска рациональных управленческих решений по количеству слотов, позиционированию, ретрансляционной точке и частотам;
- разработке модели доступа с учетом требований к качеству обслуживания приложений в сетях WiMAX;
- предложенном алгоритме выбора энергоэффективных маршрутов с учетом вариации расстояний между пользователем и базовыми станциями собственной и сторонней сети.

**Теоретическая и практическая значимость результатов состоит в:**

- определении пороговых значений показателей эффективности функционирования РНУ и МАС слоев для обеспечения QoS;
- появлении у операторов сетей WiMAX возможности определения размеров абонентской базы и/или величины интервала запроса полосы при обеспечении требуемого качества обслуживания конкретных приложений;
- повышении энергетической эффективности соединения на основе регулировки мощности при ретрансляции и за счет совместного использования частотного ресурса при сохранении требуемого качества обслуживания.

Практическая ценность работы состоит в установлении для сетей WiMAX зависимости качества обслуживания приложения от задержки доступа к регулятору распределения ресурса на уровне МАС-слоя; в создании модели рационального управления соотношением числа состязательных слотов и слотов данных МАС-кадра для сетей WiMAX; установлении возможности улучшения QoS на РНУ-уровне в сетях WiMAX с помощью ретрансляции доступа абонентской станции и совместного использования частотного ресурса смежными операторами.

**Методы исследования.**

При выполнении диссертационной работы использовались методы теории вероятностей, математической статистики и теории массового обслуживания.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Анализ показателей QoS для разных видов трафика, регламентируемого международными органами стандартизации и национальным регулятором Республики Гана.
2. Математическая модель для оценки задержки доступа к сервису или услугам в сетях WiMAX.
3. Влияние соотношения количества состязательных слотов и слотов передачи данных в МАС-кадре на качество обслуживания в сетях WiMAX.
4. Алгоритм выбора энергоэффективных маршрутов с учетом вариации расстояний между абонентской и базовыми станциями собственной и сторонней WiMAX сетей.
5. Алгоритм реализации разделения частотного ресурса между двумя операторами сетей WiMAX.

**Достоверность научных результатов** подтверждается соответствием результатов теоретического анализа результатам имитационного моделирования, доказавшим преимущества предложенных в работе моделей и алгоритмов. Результаты исследования соответствуют пунктам 5 и 12 паспорта научной специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

**Обоснованность научных положений** определяется корректностью постановки научно-технической задачи исследования, строго обоснованной совокупностью

ограничений и допущений, представительным библиографическим материалом (список использованной литературы содержит свыше 70 наименований); опорой на современную научную базу, корректным применением апробированных общенаучных и специальных методов исследования; и подтверждается соответствием результатов имитационного и аналитического моделирования, полученных разными методами, а также тем, что результаты имитационного моделирования не входят в противоречие с соображениями здравого смысла.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертации докладывались, обсуждались и получили одобрение на III и IV Международных научно-технических и научно-методических конференциях «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2014,2015), III Международной конференции «The Future of Mobile ICT and New Media Africa» Ганский университет телекоммуникаций (Акра, 2014), 68 региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов молодых ученых «Студенческая весна - 2014» (Санкт-Петербург, 2014).

#### **Полнота изложения материалов диссертации в публикациях.**

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 работах объемом 7,6 п.л., из них 6 работ в перечне рецензируемых научных журналов и изданиях, рекомендованных ВАК; личный вклад автора составляет 5,2 п.л.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 136 страницах, содержит 17 таблицы и 50 рисунков.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель работы, проблемы и задачи исследования, перечислены положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость результатов, описана структура диссертации и взаимосвязь отдельных глав.

**В первой главе** проведен анализ повышения QoS в беспроводных системах с точки зрения органов стандартизации электросвязи (МСЭ, ETSI и IEEE), систем управления и операторов мобильной связи, а также поддержки QoS в беспроводных сетях, таких как UMTS и LTE.

**Во второй главе** диссертационной работы проанализированы технология и архитектура сетей WiMAX в уровне MAC, физический уровень стандарта IEEE 802.16, механизмы обеспечения качества обслуживания в сетях WiMAX для различных видов трафика, планирование кадра и управление потоками обслуживания в сетях WiMAX

**В третьей главе** диссертационной работы описана математическая модель оценки задержки при оказании услуг за счет состязательного характера доступа к интервалу запроса полосы. Алгоритм вычисления средней задержки может быть использован для определения задержки в обслуживании приложения в зависимости от числа абонентских станций, размеров интервала запроса полосы и вероятности передачи запроса полосы каждой из абонентских станций

В процессе *запрос полосы (BR)* пакет передается в начале следующего состязательного слота (CC) как при выполнении эксперимента Бернулли. Результат эксперимента Бернулли может быть либо успешная передача пакета с вероятностью  $P_{suc}$ , либо коллизия, с вероятностью  $P_{unsuc}$ , где:

$$P_{suc} = \binom{N}{1} * (1 - p)^{N-1} = N * p * (1 - p)^{N-1} \quad (1)$$

$$P_{unsuc} = (1 - P_{suc}) \quad (2)$$

где:

$N$  – Количество абонентов;  $p$  – Вероятность того, что абонент имеет потребность в передаче BR.

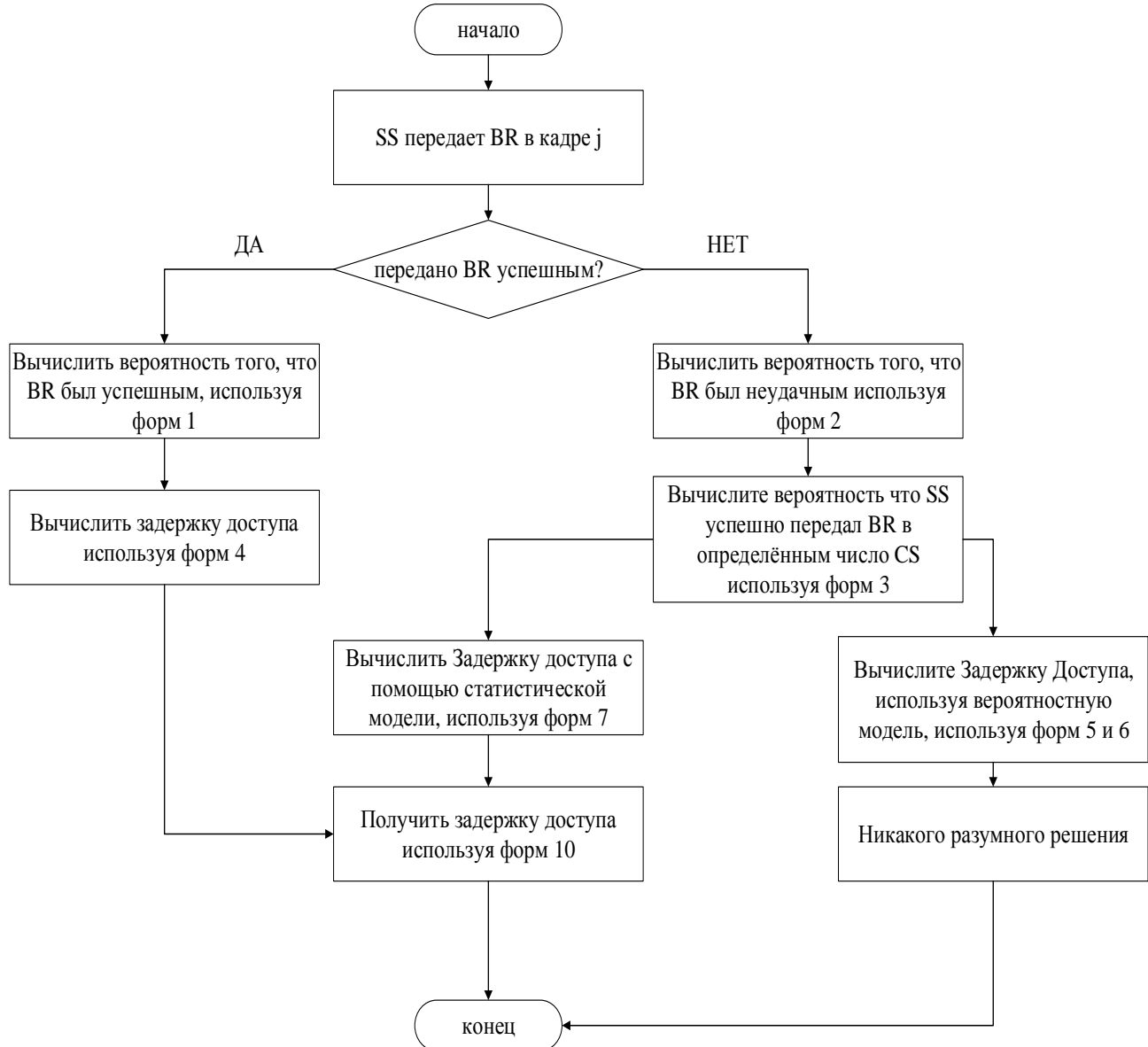


Рисунок 1 Алгоритм схемы процесса для расчета задержки доступа

В подкадре UL возможно только конечное число СС. Увеличение периода конкуренции в кадре увеличивает вероятность успешной передачи на протяжении кадра. Однако, поскольку подкадр UL имеет фиксированный размер, оно уменьшит число слотов данных (СД) и, следовательно, уменьшит пропускную способность представленного кадра.  $P_{acc}(n)$  определяется как вероятность успешного доступа абонента к услуге при конечном числе СС.  $P_{acc}(n)$  определяется как вероятность успешной передачи  $BR_i$  оборудованием абонента в данном кадре и может быть выражена следующей математической формулой:

$$P_{Acc}(n) = \sum_{k=1}^n P_{Acc}(k) = \sum_{k=1}^n (1 - P_{suc})^{k-1} * P_{suc}$$

$$P_{Acc}(n) = 1 - (1 - P_{Suc})^n \quad (3)$$

Определение задержки доступа  $BR$  (запроса полосы) – это период между первой передачей запроса полосы ( $BR$ ) и ее успешным завершением. Поскольку периоды СС чередуются с периодами СД, модель задержки доступа составляется из периодов СС и периодов СД. Если  $BR_i$  был передан успешно в одном из  $n_j$  СС (в кадре  $j$ ), то ожидаемая задержка доступа будет:

$$\overline{D_{F_j}} = \frac{n_j}{2} * T_{cs} \quad (4)$$

$T_{cs}$  – длительность СС;  $n_j$  – количество СС-х в кадре  $j$

С другой стороны, если запрос  $BR$  не был успешным в кадре  $j$ , абонентская станция (АС) повторит процедуру  $BR$  в кадре  $j+1$  и состязаться в  $n+1$  состязательных слотах. Задержка доступа в этой второй попытке может быть сформулирована как:

$$D_{acc1} = P_{acc} * \overline{D_{F_j}} + P'_{acc}(n_j) * \left\{ P_{acc}(n_{j+1}) * (T_{ULframe} + D_{F_{j+1}}) \right\} \quad (5)$$

Если  $BR$  не был успешным и во второй попытке, абонентская станция (АС) повторит процедуру  $BR$  в кадре  $j+2$  и будет состязаться в  $n+2$  состязательных слотах. Задержка доступа в этой попытке может быть сформулирована как:

$$D_{acc2} = P_{acc} * \overline{D_{F_j}} + P'_{acc}(n_j) * \left\{ P_{acc}(n_{j+1}) * (T_{ULframe} + D_{F_{j+1}}) + P'_{acc}(n_{j+1}) * \left\{ P_{acc}(n_{j+2}) * (2 * T_{ULframe} + D_{F_{j+2}}) \right\} \right\} \quad (6)$$

Этот цикл будет продолжаться, пока не исчерпается число попыток, установленных базовой станцией в начале процесса  $BR$ , т.е. если число попыток установлено как  $2^2$ , то абонентское оборудование попытается отправить  $BR$  4 раза, затем отбросит  $BR$ . Эта группа вероятностных уравнений не дает окончательного решения, поэтому для получения задержки доступа используется статистический подход. Если  $BR_i$  не был успешно передан в кадре  $j$ , ожидаемая задержка в начале кадра  $j + 1$  будет равна  $T_{UL-subframe}$ . С этого момента, поскольку результаты в текущем кадре не зависят от результатов конкуренции в предыдущем кадре, то по статистике процесс запускается вновь и может быть выражен следующей математической формулой:

$$\overline{D_{access}^l} = D_{F_j} * P_{Acc}(n_j) + [T_{UL-subframe} + \overline{D_{access}^l}] * (1 - P_{Acc}(n_j)) \quad (7)$$

где:

$T_{UL-subframe}$  – длительность UL заголовки;  $\overline{D_{access}^l}$  – средняя задержка следовательно,

$$\overline{D_{access}^l} = D_{F_j} + \frac{1 - P_{Acc}(n_j)}{P_{Acc}(n_j)} * T_{UL-subframe} \quad (8)$$

Аналитическая модель в приведенном выше уравнении показывает, что чем выше,  $P_{Acc}(n_j)$ , тем ниже второй компонент задержки, получаемый в результате возобновления конкуренции в последующем кадре. Подставляя (форм 3) и (форм 4) в (форм 8), чтобы получить  $\overline{D_{access}^l}$  как функцию  $n_j$  (количество СС-х в кадре  $j$ ) получим результирующую формулу, которая будет выглядеть следующим образом:

$$\overline{D_{access}^l} = \frac{n_j}{2} * T_{CS} + \frac{(1 - P_{Suc})^{n_j}}{1 - (1 - P_{Suc})^{n_j}} * T_{UL-subframe} \quad (9)$$

Подставляя (форм 1) в (форм 6), получаем  $\overline{D_{access}^l}$  как функцию рассматриваемых параметров:  $N$  (пропускная способность системы),  $n_j$  (№ СС кадра) и  $p$  (вероятность передачи АС)(рис 1):

$$\overline{D_{access}^i} = \frac{n_j}{2} * T_{CS} + \frac{(1-Np(1-p)^{N-1})^{n_j}}{1-(1-Np(1-p)^{N-1})^{n_j}} * T_{UL-subframe} \quad (10)$$

Кадр, содержащий СС и СД имеет фиксированный размер. При этом увеличение количества СС в кадре уменьшает задержку доступа, но приводит к уменьшению периода СД, что снижает пропускную способность системы. Результат на рисунке 2 показывает чувствительность задержки доступа к изменению выделенного количества СС. Видно, что, когда количество СС (number of contention slots) увеличивается, задержка доступа уменьшается. При 270 АС (No. Of SS) задержка доступа становится непреодолимой т.е. не удовлетворяет никаким требованиям по величине задержки для всех классов услуг.

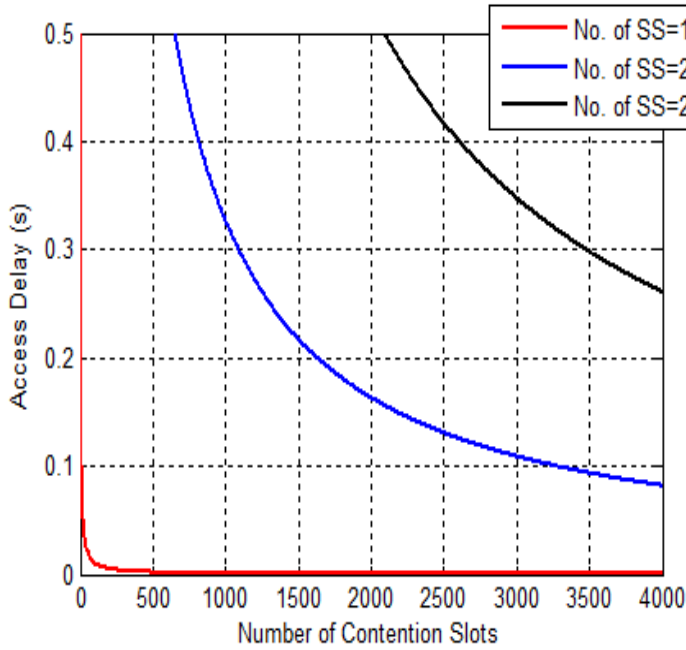


Рисунок 2. Влияние число СС на задержку доступа

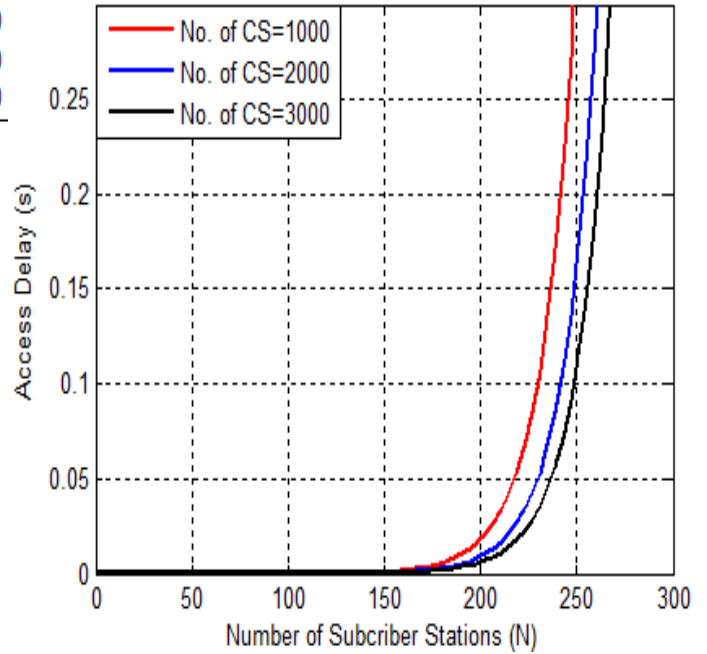


Рисунок 3 Влияние количества абонентских станций на задержку доступа

На рисунке 3 показана зависимость между ожидаемой задержкой доступа и количеством АС для различных значений количества СС с фиксированным значением вероятности передачи  $p=0,06$  и ранее указанным значением  $T_{UL-subframe}$  и  $T_{CS}$ . Заметим, что ожидаемая задержка доступа остается практически неизменной с увеличением количества СС во всем диапазоне изменения емкости системы, что делает неэффективным увеличение количества СС при попытке уменьшить задержку доступа. Например, на рисунке 3 при изменении емкости системы до 170 АС, задержка доступа остается примерно неизменной при увеличении количества СС с 1000 до 3000.

В UL кадре имеется фиксированное число возможностей для передачи  $BR$  (запрос полосы), установленной базовой станцией. Если в состязательном слоте подается только один запрос полосы, то он будет успешным. С другой стороны, если два или более абонента выставили свои запросы в одном и том же слоте запроса, произойдет конфликт и будет использоваться ТВЕВ (Truncated Binary Exponential Backoff – отсрочка передачи вследствие конфликта), чтобы решить эту проблему. Пусть  $W_i$  означает окно конфликта для состояния отсрочки  $i$ , а каждый абонент случайным образом выбирает время отсрочки в диапазоне  $[0, W_i - 1]$ . При этом ТВЕВ,  $W_i$ , определяется по формуле:

$$W_i = \begin{cases} 2^i W & 0 \leq i \leq R \\ 2^r W & r < i < R \end{cases} \quad (11)$$

Где:



$R$  – Является усеченным значением;  $W$  – Начальная окно конфликта;  $R$  – Максимально допустимое количество попыток.

Если запрос по-прежнему не проходит после  $R$  попыток, то пакет будет отброшен. Пропускная способность каждого абонента дается как  $\lambda * (1 - p^R)$ . Поскольку сеть обеспечивает производительность  $d$  слотов данных в каждом кадре с длительностью  $\Delta$ , нормированная пропускная способность сети, таким образом, дается форм 12:

$$Thru = \frac{N * \lambda * (1 - p^R) * \Delta}{d} \quad (12)$$

где:

$d$  – Количество слотов данных;  $\Delta$  – Длительность слотов данных;  $N$  – число абонентских станций;  $p$  – вероятности отказа (неудачи);  $R$  – максимально допустимое количество попыток

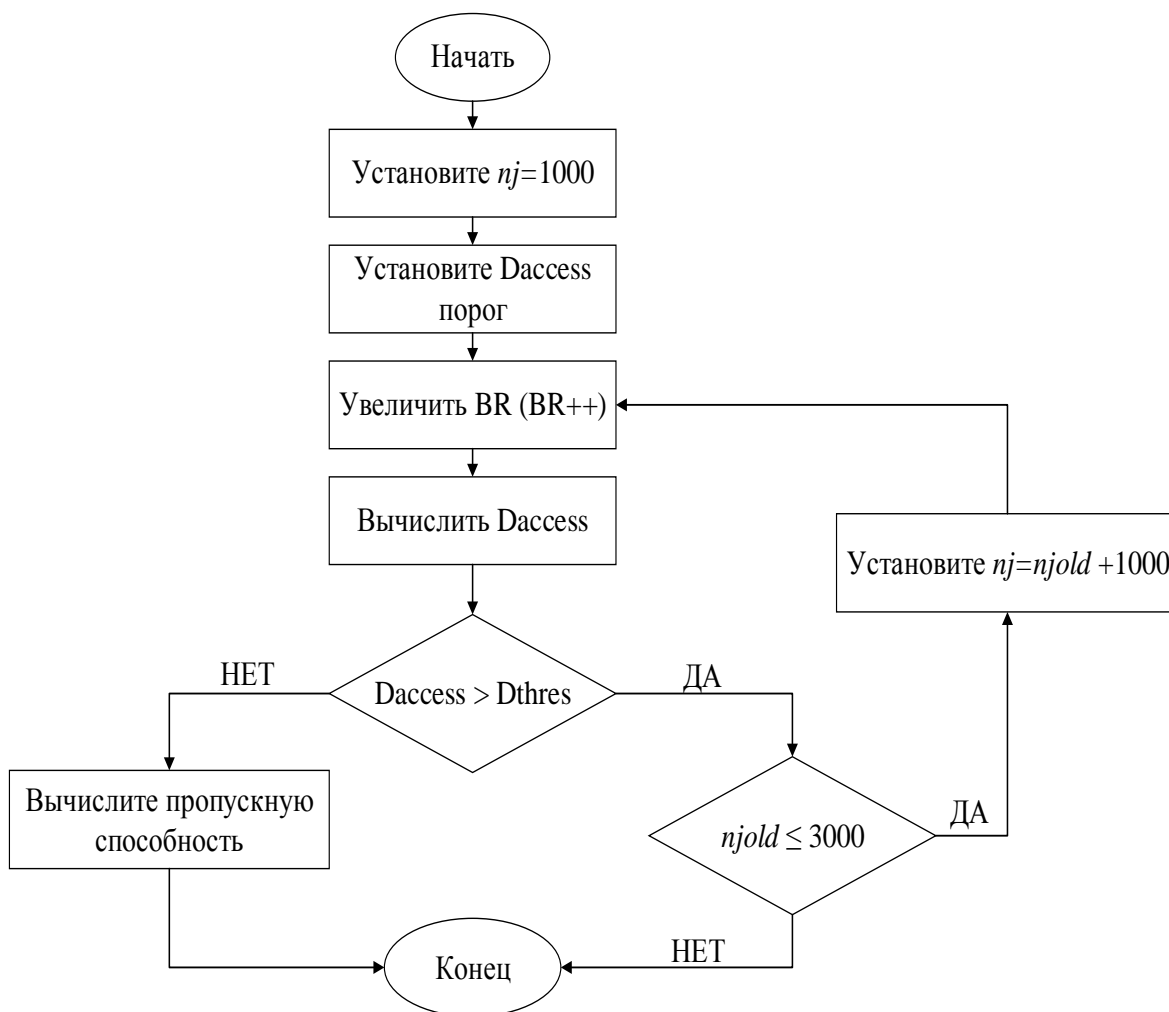


Рисунок 4 Схема алгоритма эффективного распределения СС

Рисунок 4 поясняет алгоритм, используемый для исследования эффективного распределения СС.

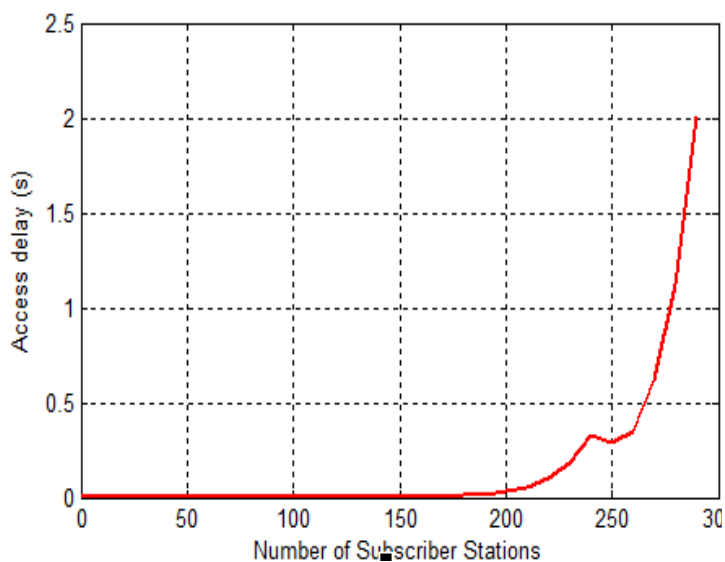


Рисунок 5. Влияние числа АС на задержку доступа

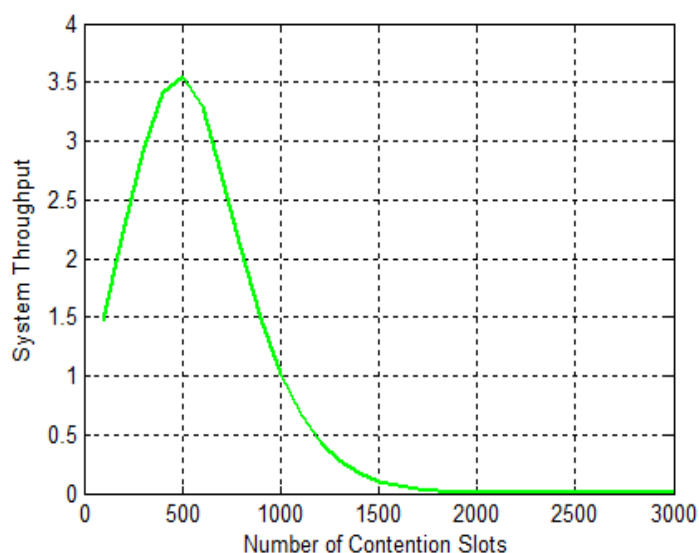


Рисунок 6. Влияние числа СС на нормированную пропускную способность

Из рисунка 5 видно, что, когда количество АС составляет около 230, задержка доступа в системе равна 0.1833, что ниже порога задержки доступа (0.2s). В следующий момент времени задержка доступа в системе увеличивается до 0.3270, что выше порога, поэтому количество СС автоматически увеличивается до 2000 СС, тем не менее, это мало влияет на задержку доступа. Это только уменьшает задержку доступа на 10.70% т.е. с 0.3270 до 0.2920, что все еще выше порога задержки доступа, поэтому количество СС увеличивается на 1000 (3000 СС), т.е. в соотношении 3:1(СС к слотам данных соответственно). Это абсолютно не влияет на задержку доступа

Из рисунка 6 видно, что в момент времени  $t=0$ , когда число СС = 0, пропускная способность системы составляет 0. Это означает, что ни один ВР не была предоставлен и, таким образом, ни один запрос не может быть выполнен. Пропускная способность системы непрерывно растет с того момента, как количество СС достигает 100. Это означает, что запросы будут выполнены. Когда количество абонентов и СС увеличивается, пропускная способность также неуклонно увеличивается.

Увеличение числа СС оказывает влияние на задержку доступа за счет изменения пропускной способности системы, поэтому количество СС, используемых для предоставления запрашиваемой полосы влияет на качество обслуживания в сети. В анализе было показано, что увеличение СС свыше 2000 не имеет значимого влияния на задержку доступа. Это было подтверждено путем моделирования с использованием пакета Matlab 2012 года. Сетевые операторы могут использовать полученные результаты при планировании сетей WiMAX, но регулировка параметров доступа может оказаться недостаточной для обеспечения требуемого качества и тогда следует предусмотреть иные возможности, некоторые из которых предложены автором в следующей главе.

**В четвертой главе** описаны методы улучшения качества обслуживания на основе регулировки мощности и совместного использования определенного частотного ресурса смежными операторами, направленной на снижение энергопотребления и улучшения экологической обстановки. Выполнен анализ и проведено сравнение с целью оценки мощности, необходимой для установления прямой линии связи (то есть, соединения абонентского оборудования с базовой станцией собственной сети) и ретранслированной

линии связи (то есть, использование внешней базовой станции сторонней сети в качестве ретрансляционной точки для связи с базовой станцией собственной сети). Параметром такой оценки является расстояние между абонентским оборудованием и базовыми станциями.

На рисунке 7 показано алгоритм для схемы релейного подхода. Расстояние до АС генерируется случайным образом – путем изменения расстояния между АС и HBS.

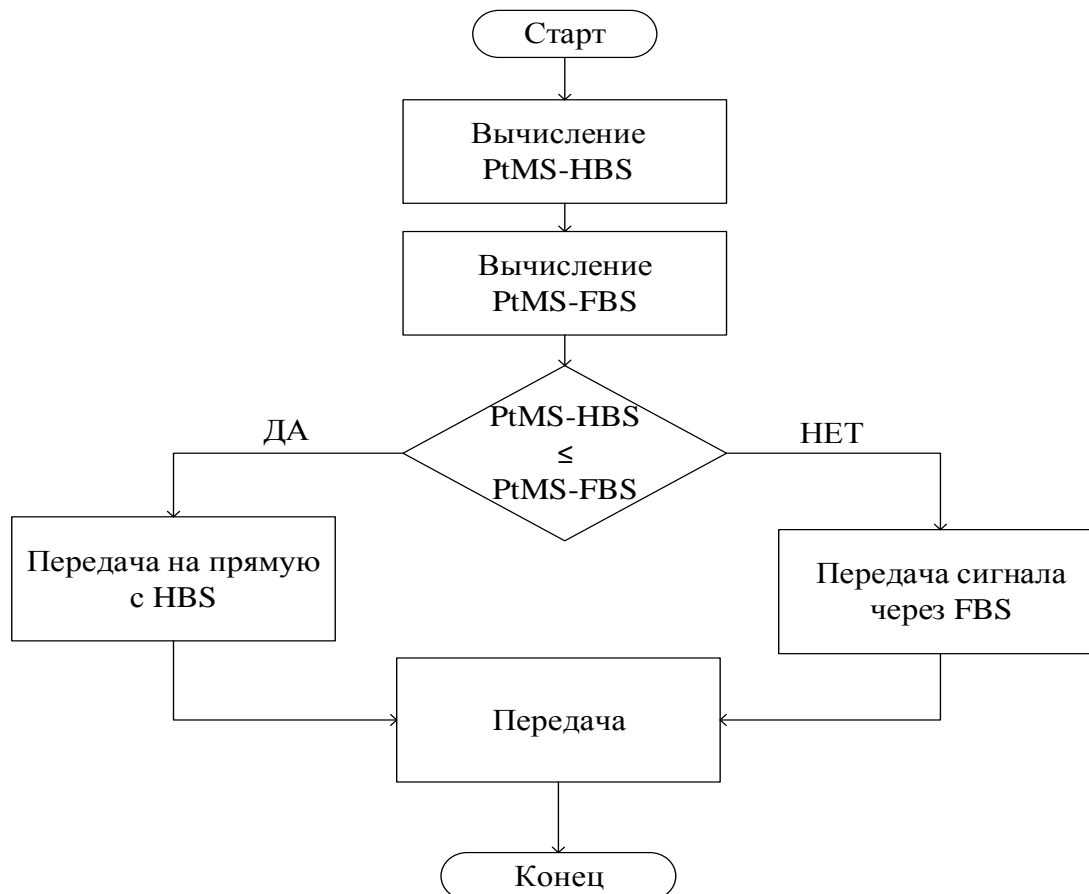


Рисунок 7 Алгоритм для схемы доступа с ретрансляцией

где

$Pt_{ms-hbs}$  - потери мощности на трассе от АС до домашней базовой станции.

$Pt_{ms-fbs}$  - потери мощности на трассе от АС до сторонней базовой станции.

$Pb_{fbs}$  - вероятность блокировки в системе с внешней базовой станцией.

$Pb_{hbs}$  - вероятность блокировки в системе с использованием только домашней базовой станции.

Потери мощности, необходимой для передачи данных в беспроводной сети, определяются наличием препятствий между передатчиком и приемником. Рассчитывается средняя мощность, используемая 1000 пользователями в каждом подразделении. Моделируются два сценария: прямого соединения (нормальное соединение передачи т.е. от АС к HBS – Direct link power) и соединения с использованием ретранслятора (передачи через FBS – Relay link power). Алгоритм разработан таким образом, что он выбирает один из этих двух сценариев: тот, который использует меньше всего потери энергии на каждом 1км дистанции (distance) связи (ALGOLINK). Результаты показаны и описаны ниже (рисунок 8):

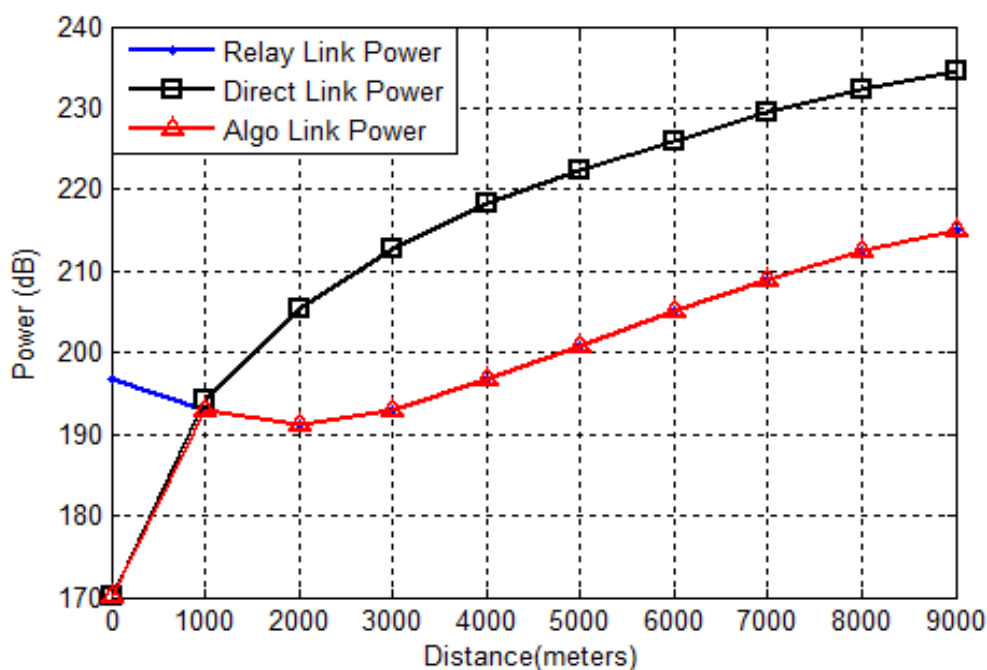


Рисунок 8 Результаты оценки мощности в ретрансляционном соединении и прямом соединении

Ниже приведен таблица 1 показывающая различия значений мощности в прямом соединении и соединении ALGOLINK. Согласно этой таблице приводится диаграмма с изложением разницы между значениями мощности.

Таблица 1. Данные по необходимым мощностям.

Потери распространения прямого соединения (дБ)	Потери распространения ALGO соединения (дБ)	Разность этих потерь распространения(дБ)
170.0079	170.0079	0
194.3079	193.0829	1.225
205.2478	191.2333	14.0145
212.81	193.116	19.694
217.9282	196.4425	21.4857
222.6641	201.1466	21.5175
226.045	205.0119	21.0331
229.4015	208.9353	20.4662
231.8288	211.9407	19.8881
234.2481	214.8693	19.3788

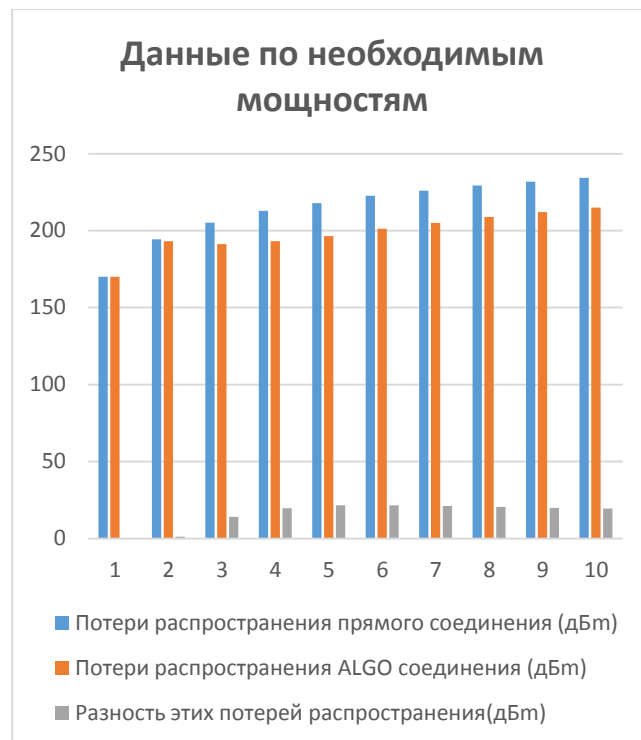


Рисунок 9 Сравнительная диаграмма потерь при прямом и ALGOLINK соединениях.

Таблица 1 и рисунок 9 выше видно, что соединение ALGOLINK решает задачу экономии энергии.

В случае совместного использования спектра предполагается, что ресурсы спектра для достижения качества обслуживания данного соединения не будут достаточными. Устанавливается порог вероятности блокировки величиной 0.7. Затем оценивается вероятность блокировки сети и сравнивается с заранее определенным порогом вероятности блокировки, как показано на рисунке 10. В случае, если значение вероятности блокировки меньше или равно пороговому значению, передача происходит при помощи собственных ресурсов сети. С другой стороны, когда вероятность блокировки выше порога, то передача проходит через соединение ALGOLINK. Для целей настоящего исследования соединение ALGOLINK моделируется таким образом, что всегда будут иметься свободные спектры совместного использования с сетью А. На рисунке 11 показан алгоритм переключения на близлежащее ALGOLINK соединение.

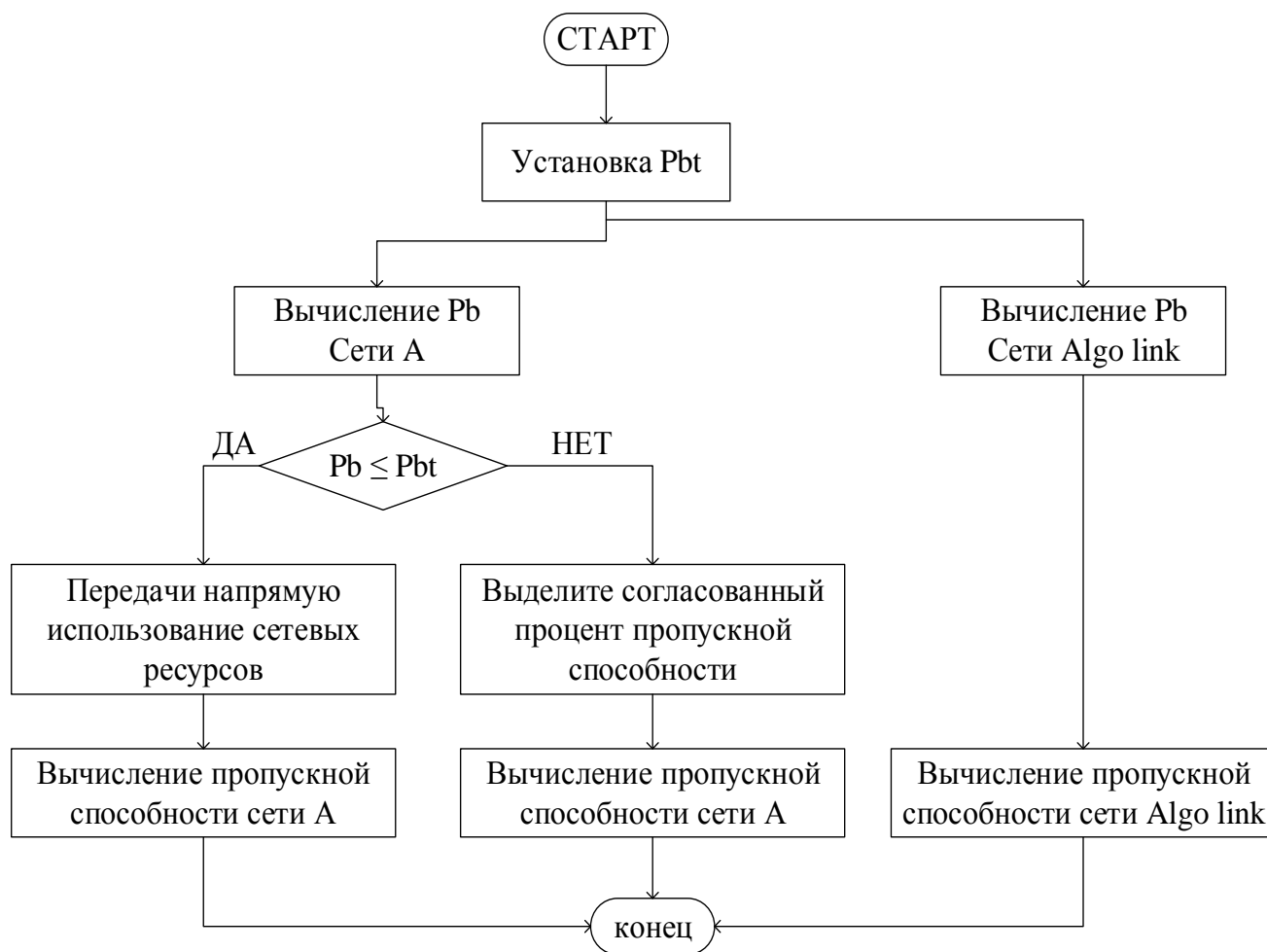


Рисунок 10 Схема алгоритма совместного использования спектра

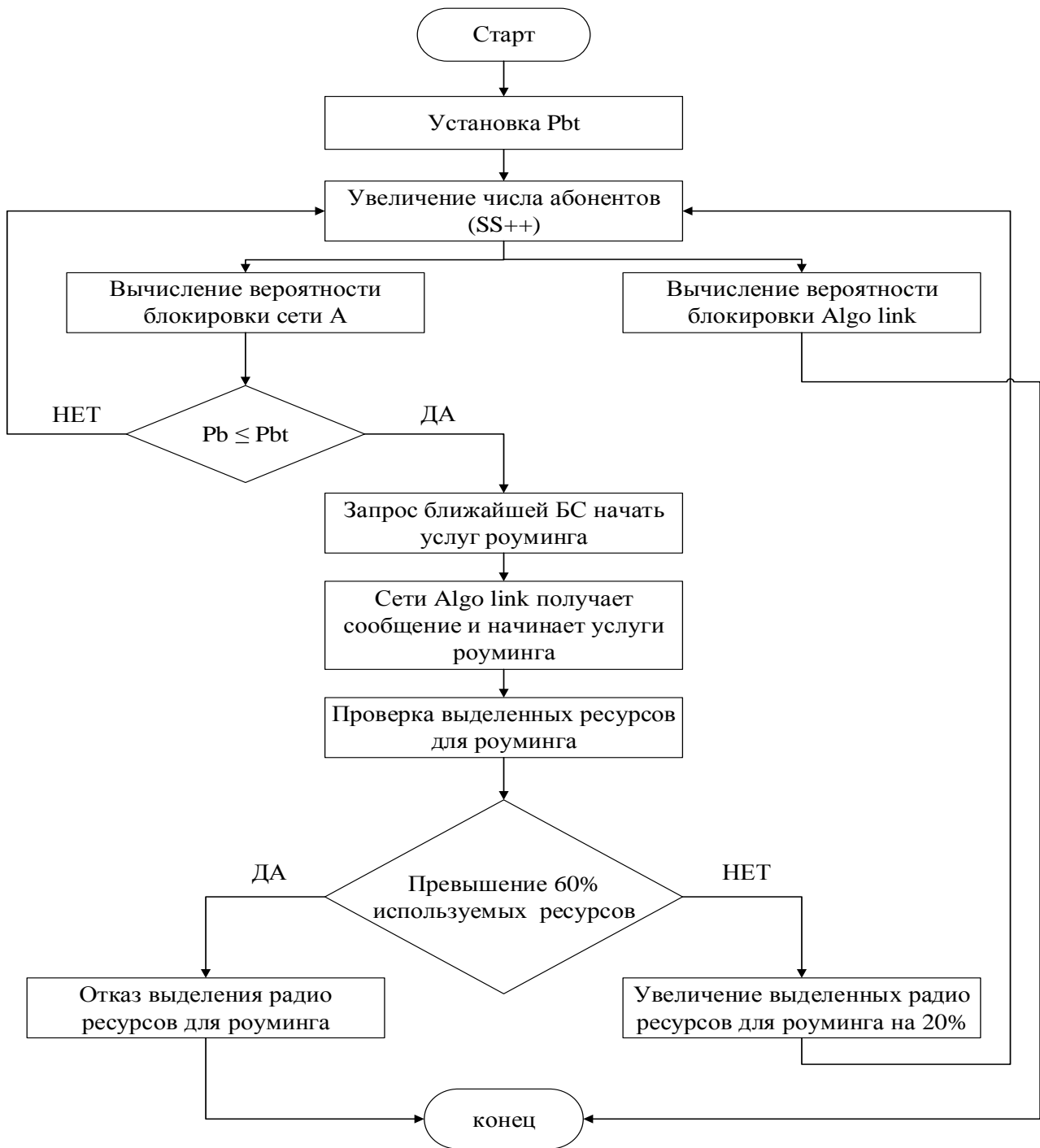


Рисунок 11 Алгоритм переключения на близлежащее ALGOLINK соединение  
где

$Pbt$  – порог вероятности блокировки вызова ;  $Pb$  – вероятность блокировки вызова

Предлагаемый подход к решению задачи совместного использования спектра реализуется следующим образом. Во-первых, допускается, что два поставщика услуг WiMAX могут иметь общий спектр, который будет использоваться в любой момент времени, когда для любого из них достигается порог вероятности блокировки. Тогда оператор может направить некоторую часть своего трафика через разделяемый частотный ресурс.

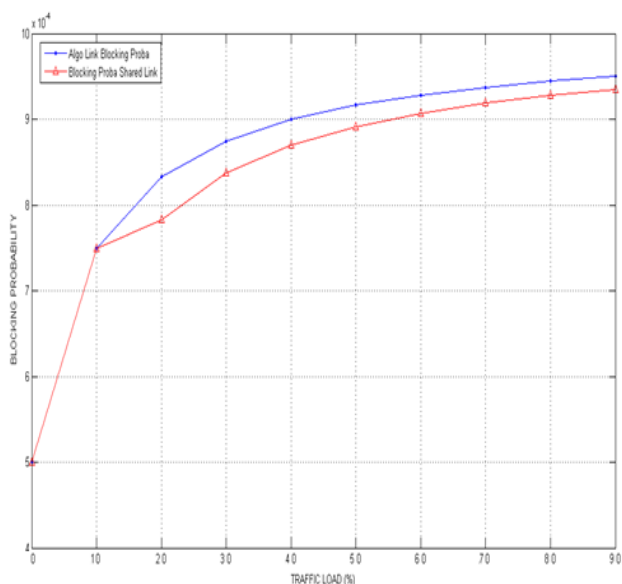


Рисунок 12 Результаты алгоритма вероятности блокировки

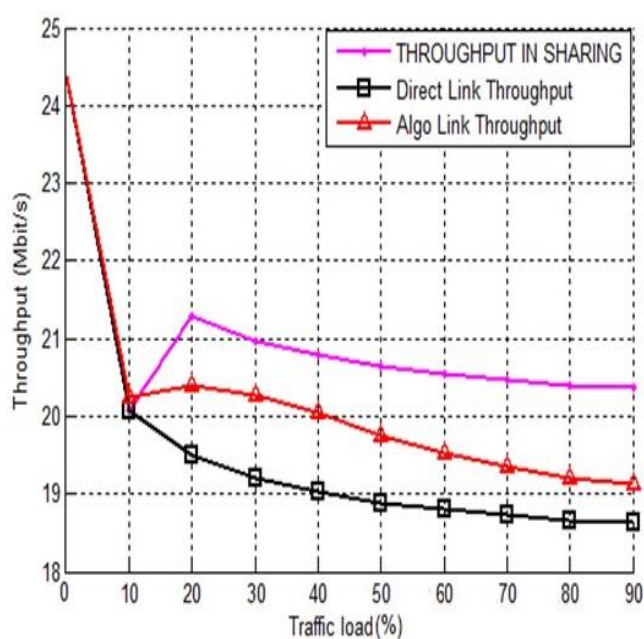


Рисунок 13. Результаты оценки пропускной способности для прямого соединения, соединения с ретрансляцией и соединения с совместным использованием спектра.

При возрастании объема трафика до 10%, пропускная способность системы, с использованием разработанного в диссертационной работе алгоритма и пропускная способность прямого соединения подобны, поскольку, как было отмечено на диаграмме мощности, соединение ALGOLINK выбирает прямое соединение на расстоянии до 1000 метров. Это происходит потому, что мощность, требуемая для прямого подключения к HBS меньше, чем при использовании ретрансляционной линии связи. С другой стороны, при рассмотрении сценария совместного использования спектра было замечено, что пропускная способность системы остается неизменной. Это происходит потому, что при этом используются обычные системные ресурсы прямого соединения (рисунок 13).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы разработана математическая модель повышения QoS на MAC- уровне и исследованы алгоритмы повышения QoS на PHY- уровне.

Для улучшения качества обслуживания в MAC-уровне и PHY- уровне, была предложена:

- Методы управления ресурсами MAC- и PHY-слоев сетей WiMAX.
- Модель доступа к интервалу запроса полосы MAC-кадра в сетях WiMAX.
- Алгоритмы выбора маршрутов соединения абонентской станции с базовыми, реализуемыми PHY-слоем сетей WiMAX.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы:

- Определены пороговые значения показателей эффективности функционирования PHY и MAC слоев для обеспечения QoS, регламентируемого международными органами стандартизации и национальным регулятором Ганы
- Установление зависимости задержки в получении доступа к услуге от соотношения числа состязательных слотов и слотов данных MAC кадра

3. Определение операторами сетей WiMAX размеров абонентской базы и/или величины интервала запроса полосы при обеспечении требуемого качества обслуживания конкретных приложений
4. Установлена возможность улучшения QoS на PHY-уровне в сетях WiMAX с помощью ретрансляции доступа абонентской станции и совместного использования частотного ресурса смежными операторами

Повышение энергетической эффективности соединения за счет регулировки мощности при ретрансляции и совместного использования частотного ресурса, при сохранении требуемого качества обслуживания.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ (ВАК – жирным шрифтом)**

1. Артур, Д. К. Повышение качество обслуживания в MAC – уровне PHY – уровне сетей WiMAX [Электронный ресурс] / Д. К. Артур, В. Е. Коротин // **Науковедение. – 2014. – Т. 6. – № 25. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/116TVN614.pdf>.**
2. Arthur, J. K. Improving QoS in UMTS network in Accra business district using towerless towers / J. K. Arthur, V. Korotin // **International Journal of Electrical Engineering (ИЖЕЕ). – 2014. – Т. 2. – № 11. – С. 1-11.**
3. Arthur, J. K. QoS requirements for bandwidth request and allocation in WiMAX Networks [Электронный ресурс] / J. K. Arthur, V. Korotin /, **Науковедение. – 2014. – Т. 5. – № 24. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/134TAVN514.pdf>.**
4. Arthur, J. K. The effect of contention slot allocation on access delay [Электронный ресурс] / J. K. Arthur, V. Korotin // **Науковедение. – 2015. – Т. 7. – № 1. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/69TangVN115.pdf>.**
5. Arthur, J. K. Improving quality of service in Worldwide Interoperability for Microwave Access network using Relay nodes [Электронный ресурс] / J. K. Arthur, V. Korotin // **Науковедение. – 2014. – Т. 5. – № 24. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/75TAVN514.pdf>.**
6. Arthur, J. K. Improving quality of service in Worldwide Interoperability for Microwave Access networks using spectrum-sharing technique [Электронный ресурс] / V. Korotin, J. K. Arthur // **Науковедение. – 2014. – Т. 5. – № 24. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/108TVN514.pdf>.**
7. Arthur J. K. Analysis of different scheduling algorithms in WiMAX [Электронный ресурс] / J. K. Arthur // **Информационные технологии и телекоммуникации. – 2014. – №2. – С. 42-50. – URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/2-14.pdf>.**
8. Артур, Д. К. Using the concept of QoS and QoE in evaluating the IEEE 802.16 standard [Электронный ресурс] / Д. К. Артур // **68-я региональная научно-техническая конференция студентов аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна - 2014»; под. ред. С. М. Доценко; сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич, Л. М. Минаков. – СПб: СПбГУТ, 2014. – С. 14-17. – URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/68sntksut.pdf>.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования "Поволжский государственный  
университет телекоммуникаций и информатики" 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого 23

Подписано в печать 04.04.16 г. Формат 60 x 84/16 Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс. Заказ \_\_\_\_\_ Печать оперативная. Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. \_\_\_\_\_

Отпечатано в издательстве учебной и научной литературы Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики 443090, г. Самара, Московское шоссе 77, т. (846) 228-00-44