

# Имитационное моделирование характеристик МАС-протокола WiMAX с учётом реальных условий

В. Г. Дроздова

В данной статье описана имитационная модель МАС-протокола WiMAX, разработанная для экспериментальной проверки вероятностно-временных характеристик, полученных ранее численно-аналитическим методом баланса интенсивностей нагрузок с учётом реальных условий: времени распространения, ограниченного числа повторных передач запросов, ограниченной ёмкости очередей, особенностей внутренней структуры протокола. Результаты моделирования могут быть использованы при исследовании вероятностно-временных характеристик и проектировании сетей WiMAX.

*Ключевые слова:* WiMAX, имитационное моделирование, МАС, баланс интенсивностей нагрузок, вероятностно-временные характеристики.

## 1. Введение

Стандарт IEEE 802.16e-2005 (WiMAX [1]) – это стандарт городских (MAN) и территориальных (WAN) сетей 4G мобильного беспроводного широкополосного доступа, описывающий протоколы физического уровня и подуровня управления доступом к среде (MAC – Medium Access Control). В качестве основного механизма управления множественным доступом к беспроводной среде стандартом предусматривается контролируемый доступ с резервированием (reservation) ресурсов беспроводной среды (MAC-R) в суперкадрах фиксированного/предопределённого формата (RFS) [3, 14].

Современные технологии беспроводного широкополосного доступа (ШПД) развиваются по пути конвергенции услуг передачи данных, телефонии, телевидения и т.п. Интеграция различных типов информации в одной системе, с неодинаковыми требованиями к скорости передачи данных и времени задержки, обуславливает необходимость обеспечения соответствующих механизмов управления качеством обслуживания (QoS).

Новые технологии требуют разработки адекватных методов анализа, учитывающих реалистические условия функционирования сети и внутреннюю структуру протокола управления доступом в среду. Системы класса WiMAX описываются многомерными моделями распределённых в пространстве очередей с приоритетным обслуживанием неоднородных потоков нагрузки. Важно отметить, что задачи анализа вероятностно-временных характеристик (VBX) таких сложных мультисервисных систем, как правило, имеют аналитические решения лишь при сильных упрощающих допущениях, не позволяющих учесть такие существенные характеристики реальных сетей, как вероятности ошибок, неоднородности входных нагрузок, реальные входные потери, повторные потоки переспросов, время распространения сигналов в беспроводной среде, системные параметры протоколов МАС, дисциплины обслуживания и т.п. [2]. Например, известны решения задач анализа протоколов WiMAX с помощью моделей Марковских цепей [8 – 9], в которых не удалось в полной мере оценить эффективность работы МАС-протоколов в реальных условиях функционирования

из-за упрощающих ограничений. В монографии [10] авторы с помощью метода преобразований Лапласа – Стильтеса (ПЛС) получили решение задачи анализа ВВХ для протоколов управления доступом к беспроводной среде вида МАС-Р, действующих на основе механизм опроса (polling). Снять перечисленные упрощающие допущения и более полно учесть реальные условия функционирования позволяет численно-аналитический метод баланса интенсивностей нагрузок [2 – 3], а также имитационное моделирование [4 – 7].

Наиболее существенные результаты имитационного моделирования в программных средах NS-2, OpNet, QualNet были представлены в работах М. Bardazzi, С. Cicconetti, А. Erta, R. Fantacci, J. Gómez, O. Gusak, L. Lenzini, D. Tarchi и др. [4 – 7]. Такой метод оценки ВВХ позволяет получить достаточно точные результаты, однако имитационные модели не приспособлены для поиска закономерностей и оптимальных решений и их применение более эффективно для экспериментальной проверки и уточнений аналитических методов.

В работах А. Б. Мархасина [2 – 3] предложен и реализован численно-аналитический метод баланса интенсивностей нагрузок, главная идея которого заключается в сведении модели единой многомерной очереди к эквивалентной сумме линейно независимых, т.е. парциальных, очередей с помощью эквивалентных законов распределения времени обслуживания в парциальных очередях. В работах [11 – 12] предложена методика расчёта вероятностно-временных характеристик МАС-протокола WiMAX на основе метода баланса интенсивностей нагрузок, позволяющая учесть реальные условия функционирования сети (ненасыщенные очереди, время распространения, помехи в радиоканале) и внутренние параметры протокола (длительности суперкадров, размеры запросов полосы, ёмкости очередей, количество повторных переспросов и т.д.). Для экспериментальной проверки адекватности полученных аналитических результатов в данной работе была разработана имитационная модель на базе C++, учитывающая особенности МАС-протокола стандарта IEEE 802.16 [1], а также влияние внешней среды.

## 2. Описание имитационной модели МАС-протокола WiMAX

МАС-протокол стандарта IEEE 802.16 – это протокол резервирования с фиксированным форматом кадра. Структура кадра WiMAX представлена на рис. 1.

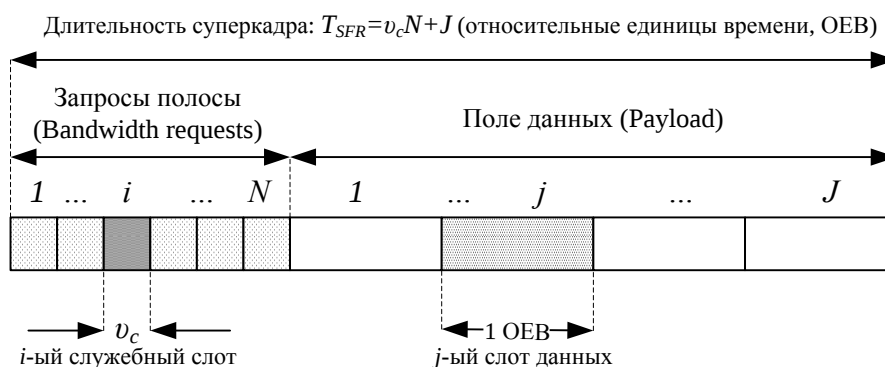


Рис.1. Суперкадр WiMAX с фиксированным форматом (восходящий канал)

Суперкадр состоит из служебной и информационной части. В служебных слотах абоненты могут резервировать ресурсы путём передачи соответствующего запроса. Стандартом предусмотрено несколько размеров суперкадра, изменяющихся в процессе функционирования системы в зависимости от величины входной нагрузки. Как правило, всегда имеет место несовпадение числа слотов данных в выделенном суперкадре с количеством заявок, имеющих в распределённых локальных очередях.

На рис. 2 представлен функциональный алгоритм имитационной модели МАС-протокола резервирования WiMAX с фиксированным форматом кадра.

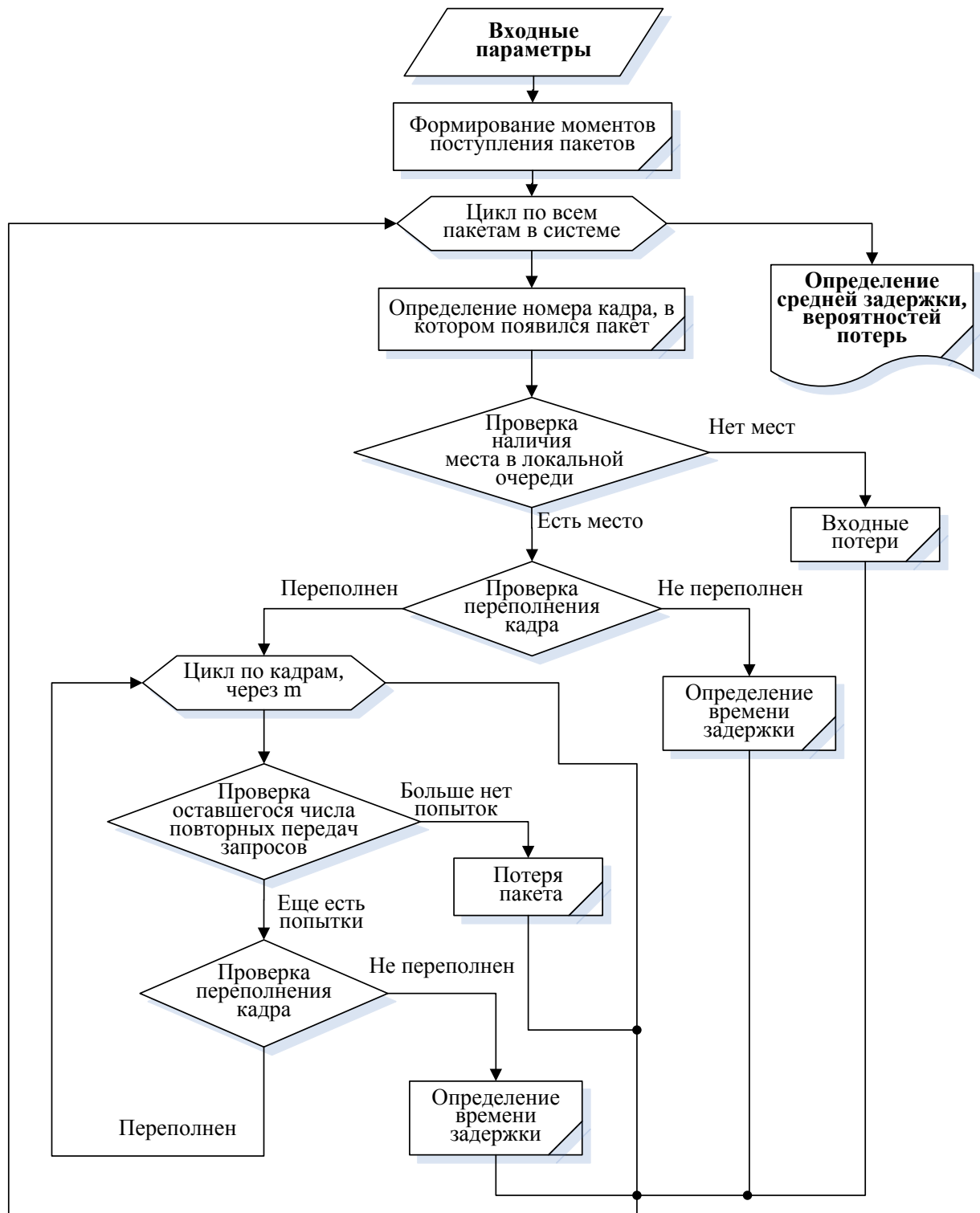


Рис.2. Функциональная блок-схема алгоритма имитационной модели MAC-протокола WiMAX

Входными параметрами для системы являются:  $G$  – интенсивность входной нагрузки;  $N$  – число абонентских станций;  $T_{PAC}$  – размер пакета;  $v_c$  – размер запроса полосы (*bandwidth request*);  $K$  – число пакетов у станции за время моделирования;  $J$  – число информационных тактов;  $T_{RTD}$  – время распространения;  $n$  – ёмкость системы;  $f$  – число повторных передач.

Команды-запросы, отклики (команды-распределения либо отказы) и реакции на них (повторные запросы либо передачи пакетов) сдвинуты во времени на определённое число суперкадров, зависящее от соотношения времени распространения сигналов «вверх-вниз»  $T_{RTD}$  и длительности суперкадров  $T_{SFR}$ . Интеракции «неуспешный запрос» – «новый запрос», а также «успешный запрос» – «передача пакета» – «неподтверждение/подтверждение приё-

ма» – «новый запрос» сдвинуты на фиксированное число  $m$  суперкадров, которое определяется выражением  $m = 3 + 2E \left( \frac{T_{RTD}}{T_{SFR}} \right)$  [11].

Перечислим основные вероятностно-временные характеристики MAC-протокола IEEE 802.16, исследуемые с помощью разработанной имитационной модели:

- среднее время задержки пакета – время с момента поступления пакета в систему до момента начала его успешной передачи;
- вероятность входных потерь – вероятность переполнения локальной очереди;
- вероятность переполнения кадра – вероятность отсутствия свободных информационных тактов в кадре;
- среднее время ожидания в очереди – время пребывания пакета в системе до момента передачи запроса.

Имитационная модель разрабатывалась с целью изучения и экспериментальной проверки BBX MAC-протокола резервирования WiMAX. Она позволяет учесть такие внутренние особенности протокола, как форматы кадров, размеры запросов полосы, ограниченность ёмкости локальных очередей, количество повторных передач запросов. Кроме того, при расчёте времени задержки учитывается время распространения сигналов. Функциональный алгоритм, приведённый на рис. 1, описывает основные этапы работы программы. Ниже приводятся основные полученные результаты.

### 3. Численные исследования

В данном разделе представлены сравнительные результаты, полученные с помощью имитационного моделирования и метода баланса интенсивностей нагрузок [11 – 13]. В табл. 1 приводятся входные данные для моделирования.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования BBX MAC-протокола WiMAX

| <i>Параметр</i>                           | <i>Значение</i>          |
|-------------------------------------------|--------------------------|
| Затраты на управление, $\nu_c$            | 0.02; 0.035; 0.05 О.Е.В. |
| Размер пакета, $T_{PAC}$                  | 1 О.Е.В.                 |
| Число станций, $N$                        | 128                      |
| Число информационных тактов в кадре, $J$  | 4; 32; 36; 38; 40        |
| Ёмкость системы, $n$                      | 1; 3; $\infty$           |
| Число повторных передач, $f$              | 1; 2; 3                  |
| Длительность окна повторения запроса, $m$ | 3                        |

Стандарт IEEE 802.16 [1] предусматривает изменение размера суперкадра при соответствующем изменении величины входной нагрузки. На рис. 3 представлены BBX, построенные в зависимости от интенсивности входной нагрузки при изменении форматной структуры кадра – размера запроса полосы (рис. 3а) и числа информационных тактов в кадре (рис. 3б).

Символами отмечены соответствующие средние значения, полученные с помощью имитационного моделирования. Так как среднеквадратическая ошибка  $\sigma$  заранее неизвестна, то вместо неё был использован эмпирический стандарт, служащий оценкой параметра  $\sigma$ , с помощью которого была получена доверительная оценка.

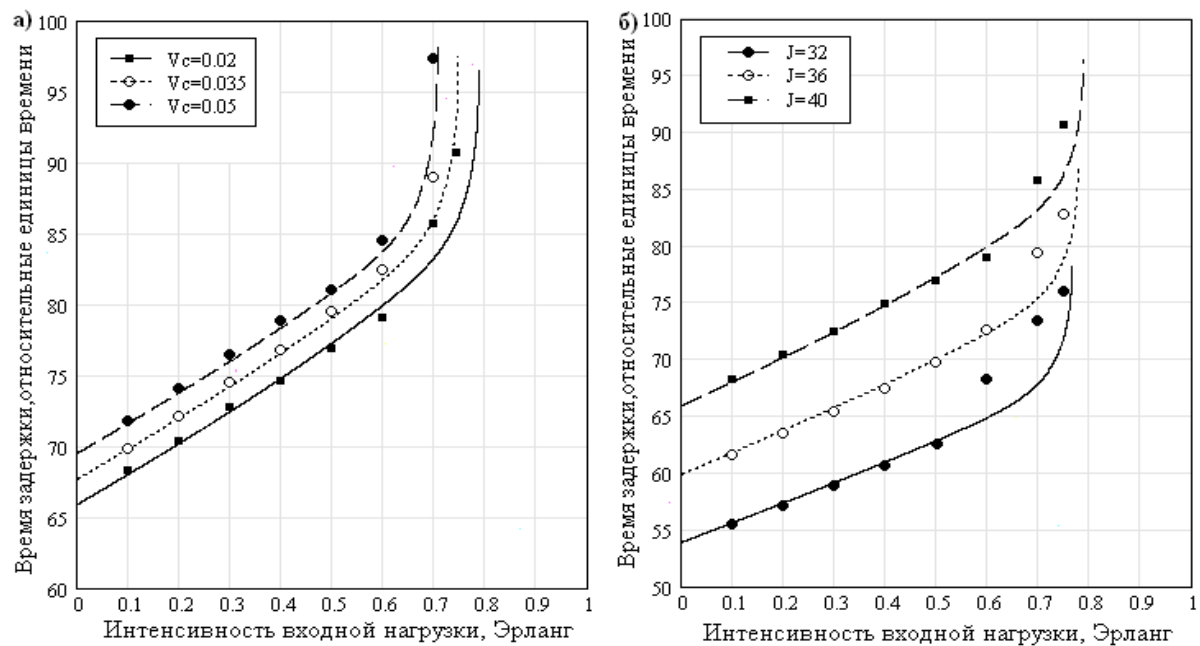


Рис.3. Время задержки в зависимости от интенсивности входной нагрузки при изменении параметров кадра: а) Размер запроса полосы ( $v_c = 0.02; 0.035; 0.05$ ); б) Число информационных слотов ( $J = 32; 36; 40$ ).

Ниже в таблицах 2 – 6 приведены сравнительные значения результатов имитационного моделирования и результатов, полученных методом баланса интенсивностей нагрузок [11 – 13], а также доверительные оценки с доверительной вероятностью  $\mathcal{P} = 0.99$ .

Таблица 2. Сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования ( $J = 32, v_c = 0.02$ )

| Нагрузка $G$ | Средняя задержка                      |                            | Доверительная оценка ( $\mathcal{P} = 0.99$ ) |
|--------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|
|              | Метод баланса интенсивностей нагрузок | Имитационное моделирование |                                               |
| 0.10         | 55.63                                 | 55.56                      | 0.55                                          |
| 0.20         | 57.42                                 | 57.21                      | 0.36                                          |
| 0.30         | 59.18                                 | 58.84                      | 0.32                                          |
| 0.40         | 60.99                                 | 60.54                      | 0.36                                          |
| 0.50         | 62.88                                 | 62.53                      | 0.32                                          |
| 0.60         | 64.92                                 | 68.12                      | 4.49                                          |
| 0.70         | 68.05                                 | 73.52                      | 10.03                                         |
| 0.75         | 72.08                                 | 75.99                      | 9.89                                          |

Таблица 3. Сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования ( $J = 36, v_c = 0.02$ )

| Нагрузка $G$ | Средняя задержка                      |                            | Доверительная оценка ( $\mathcal{P} = 0.99$ ) |
|--------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|
|              | Метод баланса интенсивностей нагрузок | Имитационное моделирование |                                               |
| 0.10         | 61.84                                 | 61.44                      | 0.46                                          |
| 0.20         | 63.81                                 | 63.42                      | 0.33                                          |
| 0.30         | 65.82                                 | 65.41                      | 0.64                                          |
| 0.40         | 67.90                                 | 67.14                      | 0.65                                          |
| 0.50         | 70.04                                 | 69.75                      | 0.87                                          |
| 0.60         | 72.40                                 | 72.78                      | 4.36                                          |
| 0.70         | 75.59                                 | 79.56                      | 5.81                                          |
| 0.75         | 79.17                                 | 83.49                      | 7.03                                          |

Таблица 4. Сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования  
( $J=40$ ,  $\nu_c=0.02$ )

| Нагрузка $G$ | Средняя задержка                      |                            | Доверительная оценка<br>( $P=0.99$ ) |
|--------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
|              | Метод баланса интенсивностей нагрузок | Имитационное моделирование |                                      |
| <b>0.10</b>  | 68.04                                 | 68.69                      | 0.38                                 |
| <b>0.20</b>  | 70.22                                 | 70.85                      | 0.47                                 |
| <b>0.30</b>  | 72.47                                 | 72.74                      | 0.26                                 |
| <b>0.40</b>  | 74.81                                 | 74.61                      | 0.39                                 |
| <b>0.50</b>  | 77.32                                 | 76.98                      | 0.32                                 |
| <b>0.60</b>  | 80.02                                 | 78.47                      | 2.49                                 |
| <b>0.70</b>  | 83.35                                 | 86.68                      | 9.33                                 |
| <b>0.75</b>  | 86.52                                 | 91.27                      | 9.48                                 |

Таблица 5. Сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования  
( $J=38$ ,  $\nu_c=0.035$ )

| Нагрузка $G$ | Средняя задержка                      |                            | Доверительная оценка<br>( $P=0.99$ ) |
|--------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
|              | Метод баланса интенсивностей нагрузок | Имитационное моделирование |                                      |
| <b>0.10</b>  | 69.84                                 | 69.94                      | 0.43                                 |
| <b>0.20</b>  | 72.00                                 | 72.15                      | 0.41                                 |
| <b>0.30</b>  | 74.24                                 | 74.84                      | 0.39                                 |
| <b>0.40</b>  | 76.59                                 | 77.01                      | 0.49                                 |
| <b>0.50</b>  | 79.08                                 | 79.89                      | 0.42                                 |
| <b>0.60</b>  | 81.82                                 | 82.96                      | 3.06                                 |
| <b>0.70</b>  | 86.19                                 | 88.87                      | 5.09                                 |

Таблица 6. Сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования  
( $J=36$ ,  $\nu_c=0.05$ )

| Нагрузка $G$ | Средняя задержка                      |                            | Доверительная оценка<br>( $P=0.99$ ) |
|--------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
|              | Метод баланса интенсивностей нагрузок | Имитационное моделирование |                                      |
| <b>0.10</b>  | 71.62                                 | 71.78                      | 0.28                                 |
| <b>0.20</b>  | 73.79                                 | 74.05                      | 0.39                                 |
| <b>0.30</b>  | 76.03                                 | 76.82                      | 0.57                                 |
| <b>0.40</b>  | 78.37                                 | 79.01                      | 0.69                                 |
| <b>0.50</b>  | 80.87                                 | 81.15                      | 0.71                                 |
| <b>0.60</b>  | 83.79                                 | 84.48                      | 3.58                                 |
| <b>0.70</b>  | 93.28                                 | 97.27                      | 6.47                                 |

Можно отметить, что среднеквадратическое отклонение при росте нагрузок от 0.1 до 0.75 Эрланг изменяется от 1–3 % до 7–12 %, что свидетельствует о высокой точности и достоверности полученных результатов.

Анализ характеристик времени задержки, изображённых на рис. 3а, демонстрирует возрастание начальной задержки и уменьшение пропускной способности при увеличении размера запроса полосы с 0.02 до 0.05 О.Е.В. Было установлено, что увеличение размера запроса полосы на 1.5 % приводит к увеличению начальной задержки и снижению пропускной способности на 4 %. Рост начальной задержки обусловлен увеличением длительности служебной части (интервала передачи запросов полосы) при фиксированной длительности кадра, так как задержка определяется с точностью до положения информационного слота в кадре.

В результате исследования характеристик задержки, приведённых на рис.3б, было установлено, что увеличение интенсивности входной нагрузки требует адаптации формата кадра

(плавного увеличения числа информационных тактов) для того, чтобы WiMAX мог обеспечить динамическое управление распределением ресурсов полосы и дифференцированными показателями качества обслуживания QoS. Для обеспечения динамического управления распределением ресурсов полосы и дифференцированными показателями качества обслуживания QoS требуется адаптация формата кадра (в частности, его длительности) к изменению интенсивности входной нагрузки.

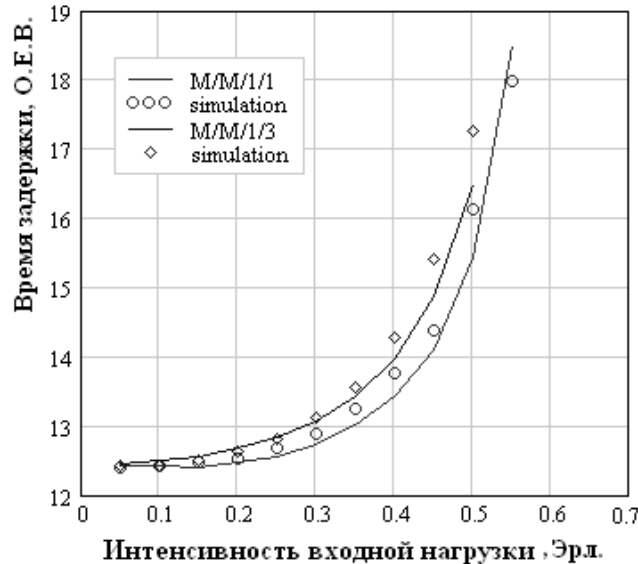


Рис.4. Время задержки в зависимости от интенсивности входной нагрузки при изменении ёмкости системы ( $n=1; 3$ )

На рис.4 представлены характеристики времени задержки в функции от интенсивности входной нагрузки при различной ёмкости системы, полученные с помощью имитационного моделирования (символы) и метода баланса интенсивностей нагрузок (кривые) [11 – 13].

На среднее время задержки одновременно оказывают влияние два фактора: ограниченность очереди (а следовательно, входные потери) и размер кадра (вероятность переполнения и соответствующие повторные передачи). Увеличение ёмкости системы приводит к закономерному увеличению средней задержки из-за роста времени ожидания в локальной очереди.

В реальных сетях WiMAX информация, передаваемая абонентом, всегда имеет определённый «срок годности». При увеличении входной нагрузки вероятность переполнения кадра будет возрастать, что приведёт к потоку повторных передач запросов. Однако число таких передач в реальности всегда ограничено некоторой величиной. Представляет значительный интерес изучение влияния ограниченности числа повторных передач на BBX WiMAX. На рис. 5 представлены вероятностно-временные характеристики в функциональной зависимости от интенсивности входной нагрузки при ограничении числа повторных передач ( $f=1; 2; 3$ ).

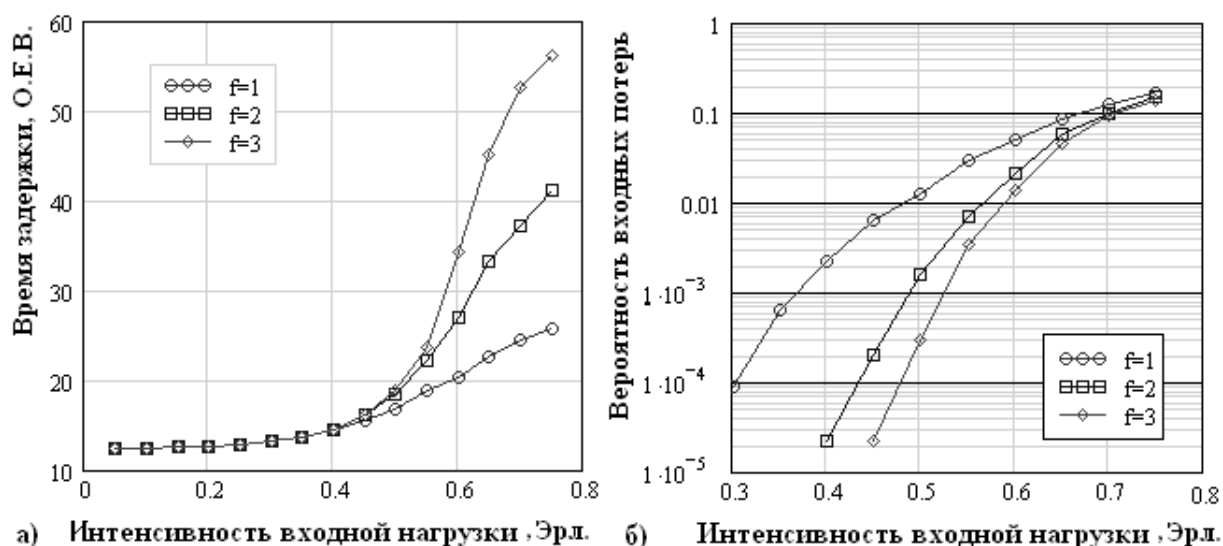


Рис.5. ВВХ в зависимости от интенсивности входной нагрузки при изменении числа переспросов ( $f=1; 2; 3; n=3$ ): а) время задержки; б) вероятность входных потерь.

Очевидно, что уменьшение числа повторных передач приводит к снижению времени задержки (рис.5а), однако при этом значительно возрастает вероятность входных потерь (рис. 5б). Требования трафика к QoS обуславливают выбор того или иного значения количества повторных передач.

#### 4. Заключение

В данной статье была описана имитационная модель МАС-протокола резервирования WiMAX с фиксированным форматом кадра, разработанная для исследования и экспериментальной проверки вероятностно-временных характеристик, полученных методом баланса интенсивностей нагрузок для реальных условий функционирования [11 – 13]. Данная имитационная модель позволяет учесть внутренние параметры МАС-протокола стандарта IEEE 802.16 (форматы кадров, ограниченная ёмкость локальных очередей, ограниченное число повторных передач), а также время распространения сигналов. Полученные характеристики с высокой надёжностью подтверждают аналитические результаты, что позволяет сделать вывод об адекватности решения, базирующегося на численно-аналитическом методе баланса интенсивностей нагрузок.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю проф. А. Б. Мархасину за помощь в постановке и решении задачи.

#### Список литературы

1. IEEE Std IEEE 802.16e-2005. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Access Systems// IEEE. 2006. 28 February.
2. Мархасин А. Б. Задачи анализа и оптимизации мультисервисных мобильных сетей // Автоматика, 2008, т. 44, №5, с.123-134.
3. Мархасин А. Б. Архитектура радиосетей передачи данных. Новосибирск: Наука, 1984. 145 с.
4. Cicconetti C., Akyildiz I. F., Lenzini L., Bandwidth Balancing in Multi-Channel IEEE 802.16 Wireless Mesh networks // Proc. of the 26th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007), Anchorage (USA). May 6-12. 2007.
5. Gusak O., Oliver N., Sohraby K., Performance Evaluation of the 802.16 Medium Access Control Layer // Lecture Notes on Computer Science, V.3280. P. 228-237. 2004.

6. Rangel V., Gómez J., Ortiz J., Performance Analysis of QoS Scheduling in Broadband IEEE 802.16 Based Networks // Proc. of OPNETWORK Technology Conference, V. 1566. Washington, USA. August 2006.
7. Tarchi D., Fantacci R., Bardazzi M., Quality of Service Management in IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Networks // IEEE International Conference on Communications, V. 4. Istanbul. P. 1789 – 1794. 06.2006.
8. Bianchi G., Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // *IEEE Journal on Selected Area in Communications*. V.18. №3. 2000.
9. Doha A., Hassanein H., IEEE 802.16 Multiple Access Control: resources allocation for reservation-based traffic // Book chapter in *WiMAX Technologies, Performance Analysis, and QoS*. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2007. P.173-210.
10. Вишневский В., Семёнова О., Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. Москва: Техносфера, 2007 г. 312 с.
11. Markhasin A., Drozdova V., QoS-Aware multifunctional Radically Distributed MAC for Wireless Large-Scale RRD Areas // IEEE Region 8 conference “SIBIRCON-2008”. P.389-394.
12. Дроздова В. Г., Вероятностно-временные характеристики мобильных и беспроводных сетей стандарта IEEE 802.16 // журнал “Телекоммуникации”. №4. апрель 2010, С.29-36.
13. Drozdova V., IEEE 802.16: analysis of probability-time characteristics // The IASTED International Conference on Automation, Control, and Information Technology Information and Communication Technology - ACIT-ICT 2010, Novosibirsk. June 15-18. 2010. P.146-150.
14. Rubin I., Access-control disciplines for multi-access communication channels: Reservation and TDMA schemes // IEEE Transactions on Information Theory. V. IT-25. May 1979. P. 516-536.

*Статья поступила в редакцию 14.12.2010*

**Дроздова Вера Геннадьевна**

аспирант, ассистент кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств СибГУТИ

e-mail: drozdova\_vera@mail.ru

### **WiMAX MAC-protocol characteristics simulation subject to real conditions**

**V. Drozdova**

In this paper WiMAX MAC-protocol simulation model developed for experimental checking of probability-time characteristics obtained with the load intensity balance method subject to propagation time, limited queues, number of retransmissions, frame formats etc. is described. The results of simulation can be used for probability-time characteristics investigation and for WiMAX networks design.

**Keywords:** WiMAX, Simulation, MAC, load intensity balance, probability-time characteristics.