

УДК 681.324

Г.А. Кучук<sup>1</sup>, А.А. Можаяев<sup>1</sup>, А.А. Коваленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОЧЕРЕДЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

*Рассмотрены вопросы асимптотического исследования очередей в высокоскоростных телекоммуникационных сетях и определены границы предлагаемых модельных аппроксимаций. Проведены исследования, позволяющие определить необходимую точность и вычислительную мощность, которые требуются для вычисления аппроксимации максимума. Установлено, что экспоненциальные временные шкалы являются оптимальными для трафика фрактального броуновского движения в смысле согласования. Проведенные эксперименты показали влияние хвостов распределений в различных масштабах времени на процесс организации очередей. Наблюдается, что при негауссовских трафиковых сценариях корреляционная структура (краткосрочная и долгосрочная) описывает поведение очередей недостаточно адекватно. В связи с этим определены направления дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, асимптотический анализ, негауссовский процесс, фрактальное броуновское движение, фрактальный гауссовский шум, мультифрактальная вейвлет-модель.

### Введение

**Постановка задачи и анализ литературы.** В настоящее время наличие фрактальных особенностей трафика высокоскоростных сетей передачи

данных в основном не вызывает неприятия у большинства специалистов [1 – 6]. В то же время в отличие от хорошо разработанной области построения очередей для марковских моделей для систем построения очередей с долговременно зависимыми

процессами на входе существует только несколько теоретических результатов [7 – 9]. Особое значение получают исследования многочисленных не асимптотических ошибочных ограничений, асимптотики поведения больших очередей и другие ограничения аппроксимаций разнообразных моделей трафика, таких как фрактальное броуновское движение (ФБД), фрактальный гауссовский шум (ФГШ), независимая гауссовская модель области вейвлета (НГМОВ) и мультифрактальную вейвлет-модель (МФВМ).

В случае входного трафика, описываемого ФБД-моделью, необходимо проанализировать справедливость аппроксимаций возникновения хвоста очереди (ВХО)  $P\{Q_\infty > b\}$  максимумом, произведением и суммой асимптотически больших порогов очередей, то есть при  $b \rightarrow \infty$ . Поскольку такие результаты не всегда непосредственно применимы к сценариям с конечными очередями, они часто предоставляют идеи для проектирования сетей [5, 6, 9].

Определим основные понятия и соотношения. В случае когда

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \frac{\Omega(b)}{Y(b)} = 1 \quad (1)$$

можно предположить, что  $\Omega$  и  $Y$  имеют одинаковое асимптотическое затухание, и обозначим их с помощью  $\Omega \cong Y$ .

Если  $\log \Omega(b) \cong \log Y(b)$ , предполагаем, что  $\Omega$  имеет такое же логарифмически-асимптотическое затухание, как и  $Y$ . При условии что  $\Omega(b) \rightarrow 0$  и  $b \rightarrow \infty$ , легко показать, что асимптотическое затухание влияет на логарифмически-асимптотическое затухание, т.е.

$$(\Omega(b) \cong Y(b)) \Rightarrow (\log \Omega(b) \cong \log Y(b)), \quad (2)$$

но не наоборот.

Пусть  $Y$  – асимптотическая верхняя граница  $\Omega$  при условии

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \frac{\Omega(b)}{Y(b)} = 0. \quad (3)$$

Ранее было установлено, что  $P\{Q_\infty > b\}$  и  $C(b)$  имеют одинаковое логарифмически-асимптотическое поведение [10 – 13]:

$$\log P\{Q_\infty > b\} \cong \log C(b) \cong -\frac{\eta b^{-(2-2H)}}{2}, \quad (4)$$

где  $\eta > 0$  является константой, зависящей от параметров трафика и не зависящей от значения  $b$ . Однако  $P\{Q_\infty > b\}$  и  $C(b)$  не имеют такого же асимптотического поведения:  $P\{Q_\infty > b\}$  является асимптотической верхней границей  $C(b)$ . Интересным при переходных условиях является то, что для постоянно-

го  $t$ ,  $P\{Q_t > b\}$  имеет такое же асимптотическое поведение, как и  $\sup_{0 \leq \tau \leq t} P\{K_t[\tau] - c\tau > b\}$  [14].

Но как было отмечено выше, асимптотический анализ поведения очередей и границ их аппроксимаций позволит создать более адекватные модели процесса передачи информации в телекоммуникационных сетях, что обеспечивает актуальность рассматриваемой проблемы.

**Целью данной статьи** является асимптотическое исследование очередей в высокоскоростных телекоммуникационных сетях и определение границ предлагаемых модельных аппроксимаций.

## 1. Результаты теоретических исследований

В последнее время установлено, что наиболее приемлемым описанием поведения хвостов очереди для модели ФБД является асимптотическое распределение Вейбулла и Паретто [4, 5, 8 – 10]:

$$P\{Q_\infty > b\} \cong \mathfrak{B} b^{(1-H)(1-2H)/H} e^{-\eta b^{(2-2H)/2}}, \quad (5)$$

где  $\mathfrak{B}$  является константой, не зависящей от значения  $b$ .

Если показатель Херста в (5) изменяется в пределах  $0,5 < H < 1$ , это указывает на то, что трафиковый процесс для модели ФБД обладает долговременной зависимостью (ДВЗ), и распределение Вейбулла убывает медленнее, чем экспоненциальное распределение очереди трафика, не обладающего ДВЗ.

Тогда, исходя из (5) получим, что  $e^{-\eta b^{(2-2H)/2}}$  является асимптотической верхней границей  $P\{Q_\infty > b\}$  при  $0,5 < H < 1$ .

Теперь сравним степени логарифмически-асимптотического и асимптотического поведений для аппроксимаций максимума, произведения и суммы при  $P\{Q_\infty > b\}$ . Для этого можно доказать такое соотношение.

Аппроксимации максимума, произведения и суммы имеют одинаковое логарифмически-асимптотическое поведение, поскольку

$$P\{Q^{[\theta_\alpha]} > b_k\} \text{ и } P\{Q_\infty > b_k\};$$

т.е.  $b_k \rightarrow \infty$ , получим

$$\begin{aligned} \log M^{[\theta_\alpha]}(b_k) &\cong \log P^{[\theta_\alpha]}(b_k) \cong \log S^{[\theta_\alpha]}(b_k) \cong \\ &\cong \log P\{Q^{[\theta_\alpha]} > b_k\} \cong \log P\{Q_\infty > b_k\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Кроме того, аппроксимации максимума, произведения и суммы имеют одинаковое асимптотическое спадание, поскольку  $P\{Q^{[\theta_\alpha]} > b_k\}$ ; т.е. при  $b_k \rightarrow \infty$ , получим

$$M^{[\theta_\alpha]}(b_k) \cong P^{[\theta_\alpha]}(b_k) \cong S^{[\theta_\alpha]}(b_k) \cong P\{Q^{[\theta_\alpha]} > b_k\}. \quad (7)$$

В то же время

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P\{Q^{[\theta_\alpha]} > b_k\} / P\{Q_\infty > b_k\} = 0. \quad (8)$$

Таким образом, видны достоинства и ограничения использования статистических характеристик трафика только на экспоненциальных временных шкалах  $\theta_\alpha$  для выявления характера поведения очередей. Согласно (2) и (6),  $Q^{[\theta_\alpha]}$  аппроксимирует размер очереди  $Q$  на временных шкалах  $\tau \in \theta_\alpha$ .

Согласно (7), аппроксимации максимума, произведения и суммы имеют одинаковое асимптотическое затухание, поскольку  $P\{Q^{[\theta_\alpha]} > b_k\}$ . Как результат, они имеют одинаковые логарифмически-асимптотические затухания, но различное асимптотическое затухание, поскольку  $P\{Q_\infty > b_k\}$ . Далее представлены не-асимптотические результаты сравнения различных аппроксимаций с  $P\{Q^{[\theta_\alpha]} > b_k\}$ .

Знание того, имеют ли различные аппроксимации верхнюю или нижнюю границы  $P\{Q > b\}$  помогает различным приложениям. Например, если мы зададим коэффициент обслуживания очереди такой, что аппроксимация критической временной шкалы  $C(b)$  будет равняться  $10^{-6}$ , то мы должны ожидать реальной вероятностью появления хвоста очереди  $P\{Q > b\}$  превышения значения  $10^{-6}$ , поскольку  $C(b)$  ограничивает снизу  $P\{Q > b\}$ . Если заменить нижнюю границу  $C(b)$  аппроксимацией, т.е. верхней границей  $P\{Q > b\}$ , то  $P\{Q > b\}$  будет гарантировано меньше  $10^{-6}$ .

В дальнейшем проводится исследования справедливости аппроксимаций максимума, произведения и суммы  $P\{Q > b\}$  с помощью моделирования на основе фрактального Броуновского движения, фрактального гауссовского шума, независимой Гауссовской модели области вейвлет и мультифрактальной вейвлет-модели, наряду с видео и Интернет трафиком.

Особое внимание уделяется экспоненциальным временным масштабам с  $\alpha = 2$  (т.е.  $\theta = \theta_2$ ).

## 2. Сравнение аппроксимаций для трафика ФГШ

Сравним с помощью моделирования две различные аппроксимации  $P\{Q > b\}$  для трафика ФГШ. Моделирования используют графики ФГШ с параметром Херста  $H=0,8$  и стандартным отклонением на 1 с временной шкале  $\sigma = 8 \times 10^5$  бит, сгенерированных методом, описанным в [9]. Устанавли-

ваем  $\tau' = 10^{-4}$  с,  $c = 10 \text{ Мб} \cdot \text{с}^{-1}$  и изменяем среднюю скорость для получения различного коэффициента использования.

Значение  $P\{Q_\infty > b\}$  оценивается для каждого сценария моделирования, как часть времени, в течение которого размер очереди превышал значение  $b$ . Для устранения переходных процессов оценки размера очереди делаются во второй половине времени моделирования. Графики вероятности хвоста очереди соответствуют среднему значению, полученному за 300 моделирований. Каждый сценарий моделирования включал пересылку  $2^{19}$  бит данных, соответствующих 52 с моделирования.

Результаты моделирования для двух различных коэффициентов использования приведены на рис. 1.

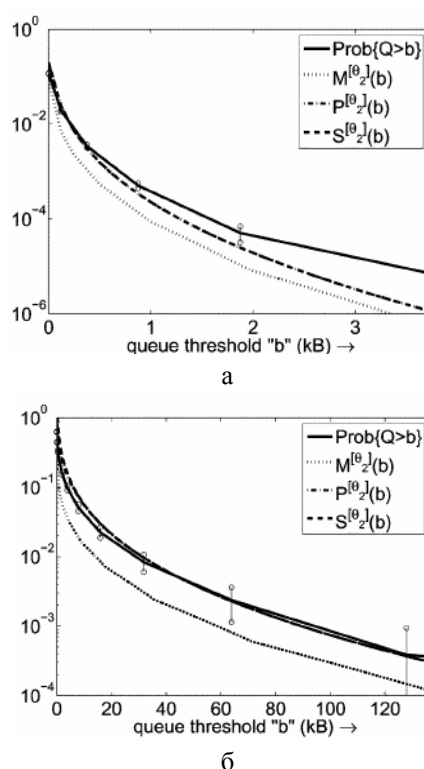


Рис. 1. Сравнение аппроксимаций максимума, произведения и суммы с  $P\{Q_\infty > b\}$  для трафика ФГШ с параметром  $H=0,8$ , пропускной способностью канала 10 Мб/с и  $\sigma = 8 \times 10^5$  бит: а – 30% использования; б – 80% использования

На рис. 1 для случаев 30 и 80% использования аппроксимации произведения и суммы близки к  $P\{Q > b\}$  для широкого диапазона пороговых значений очереди  $b$ . Аппроксимацией максимума является нижняя граница  $P\{Q > b\}$ , являющаяся точной при данном порядке величин.

Различные аппроксимации были получены выбором  $\theta = \{\tau', 2\tau', \dots, 2^{20}\tau'\}$ , эквивалентных  $\theta_2$ , усеченных для попадания в определенное число вре-

менных шкал. Наблюдается, что во всех случаях  $M^{[0_2]}(b)$  является нижней границей  $P\{Q > b\}$ . Также видно, что  $M^{[0_2]}(b)$  находится внутри изменения величины  $P\{Q > b\}$ . Можно сделать вывод, что  $C(b)$ , находящееся между  $M^{[0_2]}(b)$  и  $P\{Q > b\}$ , также находится внутри  $P\{Q > b\}$  для такого же диапазона.

Согласно с результатами, показанными на рис. 1, аппроксимации произведения и суммы являются практически идентичными и в точности совпадают с  $P\{Q > b\}$  для широкого диапазона размеров очереди  $b$ . В общем смысле они также являются лучшими аппроксимациями, чем аппроксимация максимума. Однако, в отличие от аппроксимации максимума, которая является гарантированной нижней границей  $P\{Q > b\}$ , эти две аппроксимации не ограничивают значение  $P\{Q > b\}$  сверху или снизу, а фактически пересекают его в некоторой точке. Обозначим порог очереди, при котором пересекаются значения аппроксимации произведения и  $P\{Q > b\}$ , как  $b'$ . Наблюдается, что во всех случаях значение аппроксимации произведения является большим, чем  $P\{Q > b\}$ , а при  $b=0$  и  $b > b'$  всегда меньше, чем  $P\{Q > b\}$ . Итак, для  $b > b'$  аппроксимация произведения лежит между аппроксимацией максимума и  $P\{Q > b\}$ , что гарантирует лучший уровень аппроксимации, чем у аппроксимации максимума. У аппроксимации суммы наблюдается сходное поведение.

### 3. Влияние распределения на очереди

Влияние различных статистических характеристик трафика на поведение очередей интенсивно изучается. Некоторые исследования, в частности, освещают влияние ДВЗ [10]. ДВЗ является лишь функцией асимптотической корреляционной структуры трафика второго порядка (или дисперсией трафика на различных масштабах времени).

Сравним поведения очередей НГМОВ и МФВМ процессов с видео и Интернет WAN трафиком с помощью моделирования. Они отличаются статистическими характеристиками: НГМОВ является гауссовским процессом, тогда как МФВМ – негауссовским. Анализ полученных результатов производится с использованием аппроксимации произведения и результатов работ по влиянию коэффициента использования канала на динамику очередей [11 – 14].

#### 3.1. Анализ графиков (рис. 2, 3)

Два графика для AUCK показывают количество байт за 2 мс записи трафика WAN и VIDEO, состоящего из 15 видеоклипов, мультиплексированных случайными начальными точками [8]. Наилучшая временная шкала для VIDEO соответствует 2.77 мс, 1/15 длительности одиночного фрейма. Средние скорости AUCK и

VIDEO равны 1,456 и 53,8 Mb/s, соответственно. AUCK содержит  $1,8 \cdot 10^6$  бит данных, а VIDEO –  $2^{18}$ . Параметр Херста для AUCK, полученный из графика дисперсия-время используя временные шкалы от 512 мс до 262,144 с, равен  $H=0,86$ . Для VIDEO  $H=0,84$  при использовании временных шкал от 354 мс до 90,76 с.

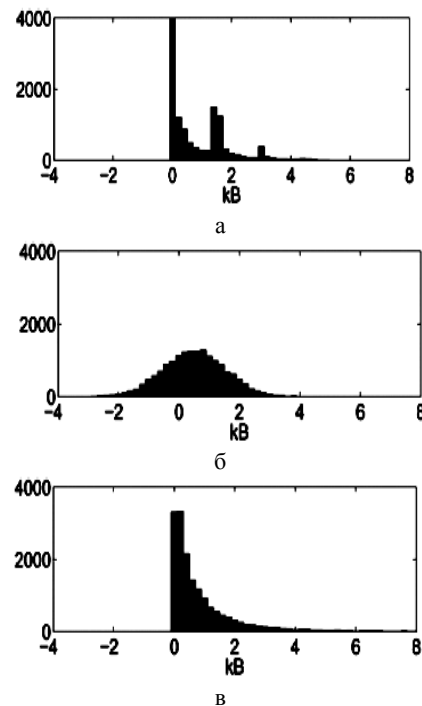


Рис. 2. Гистограммы байт в единицу времени процессов на временной шкале 2 мс для а – WAN трафика University of Auckland (AUCK), б – реализации НГМОВ модели, в – реализации МФВМ

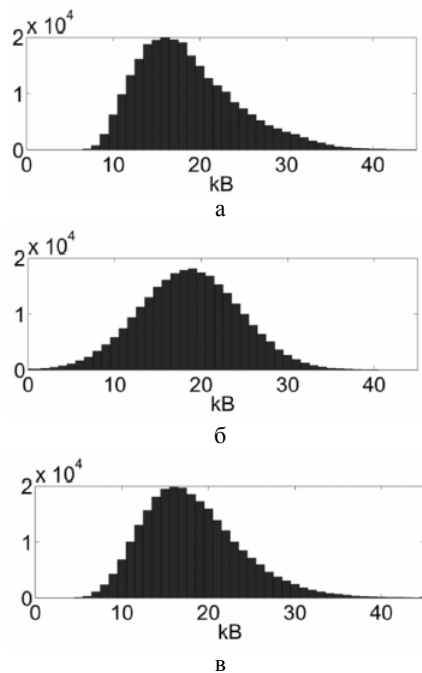


Рис. 3. Гистограммы байт в единицу времени процессов на временной шкале 2.77 мс для: а – видео трафика, полученного мультиплексированием 15 видеотрафиков (VIDEO), б – реализации НГМОВ модели, в – реализации МФВМ

Из рис. 2, 3 видно, что AUCK содержит строго негауссовские распределения, тогда как распределение VIDEO похоже на распределение Гаусса. МФВМ лучше совпадает с характеристиками видеотрафика, чем НГМОВ; однако видеотрафик имеет более гауссовский характер, чем AUCK трафик

### 3.2. Анализ результатов моделирования

Модели НГМОВ и МФВМ были согласованы с реальными данными и проведена генерация суммарного трафика. Затем производилось сравнение поведения очередей суммарного трафика с реальными данными, когда они поступают в очередь бесконечной длины с постоянной интенсивностью обслуживания. Графики  $P\{Q > b\}$  соответствуют среднему значению, полученному за 1000 реализаций.

Вначале представлены результаты для большого коэффициента использования канала (>70%). Согласно рис. 2, а и 2, б, где использовался МФВМ трафик AUCK, реальный и суммарный трафики проявляют асимптотические Вейбулловские вероятности хвоста очереди, в соответствии с теорией для ДВЗ трафика. В отличие от такого асимптотического совпадения, МФВМ намного ближе к поведению очередей реального трафика. Пропускная способность использовавшегося канала равна 2 Мб/с, что привело к его использованию на 72%.

В экспериментах с трафиком VIDEO [рис. 4, с, д], который намного более близок к гауссовскому процессу, чем AUCK, наблюдается близкое совпадение НГМОВ и МФВМ с правильным поведением очередей, что убеждает в том, что МФВМ является

достаточно гибкой для моделирования гауссовского трафика. гауссо-подобный трафик, который должен быть позитивным, непременно имеет среднее, по меньшей мере, сравнимое с его стандартным отклонением. Поскольку для большого среднего по отношению к коэффициенту стандартного отклонения, логарифмически нормальные и гауссовские распределения между собой очень сходны, то приблизительно логонормальная модель МФВМ является применимой для гауссовского трафика [5]. Пропускная способность соединения равна 69 Мб/с, что соответствует использованию на 77%. На рисунке 4, б наблюдается, что трафик МФВМ близко совпадает с AUCK, тогда как на рис. 4, а, в трафик НГМОВ не так близок к совпадению. В случаях на рис. 4, в и рис. 4, д наблюдается совпадение трафиков НГМОВ и МФВМ с трафиком VIDEO. Аппроксимация произведения  $P^{[\theta_1]}(b_k)$  близка к эмпирическому поведению очереди для синтезированных трафиков НГМОВ и МФВМ, и показывает себя лучше, чем аппроксимация максимума  $M^{[\theta_2]}(b)$

В случае меньшего коэффициента использования канала (<50%), из рис. 5 видно, что модель МФВМ превосходит НГМОВ как для трафика AUCK, так и для VIDEO на большем интервале, чем при большом коэффициенте использования канала. Для МФВМ и НГМОВ наблюдается, что аппроксимация произведения близка к  $P\{Q > b\}$  (рис. 4, 5). Аппроксимация максимума находится внутри порядка величины  $P\{Q > b\}$ .

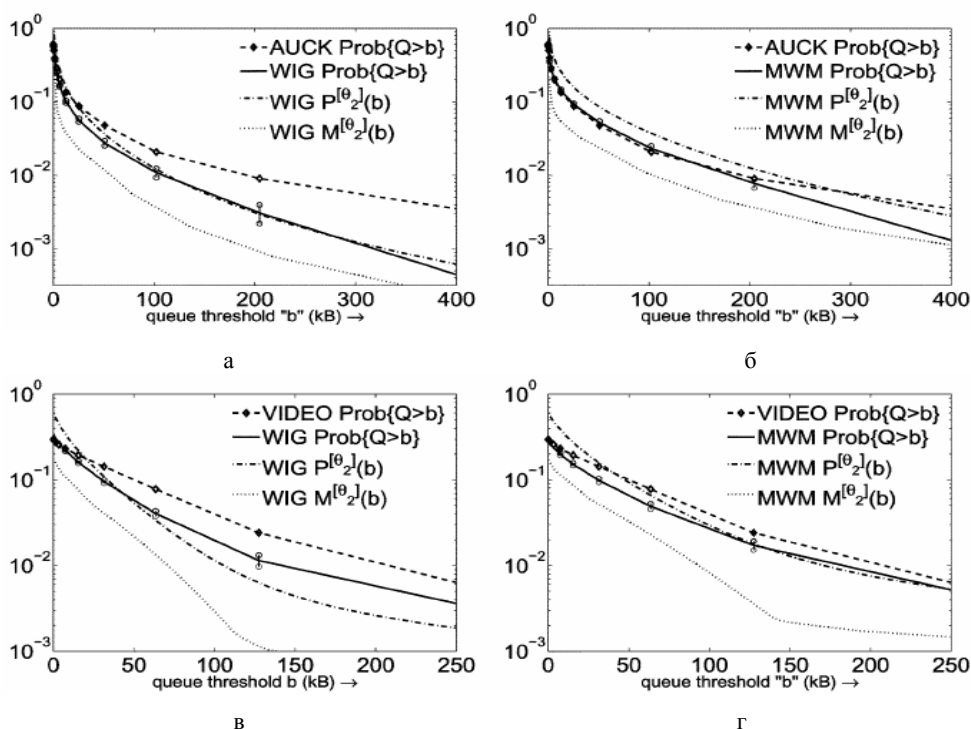


Рис. 4. Производительность очередей реального и синтетического трафика для НГМОВ и НГМОВ моделей при большом коэффициенте использования канала: а – AUCK и НГМОВ; б – AUCK и НГМОВ; с – VIDEO и WIG; д – VIDEO и МФВМ.

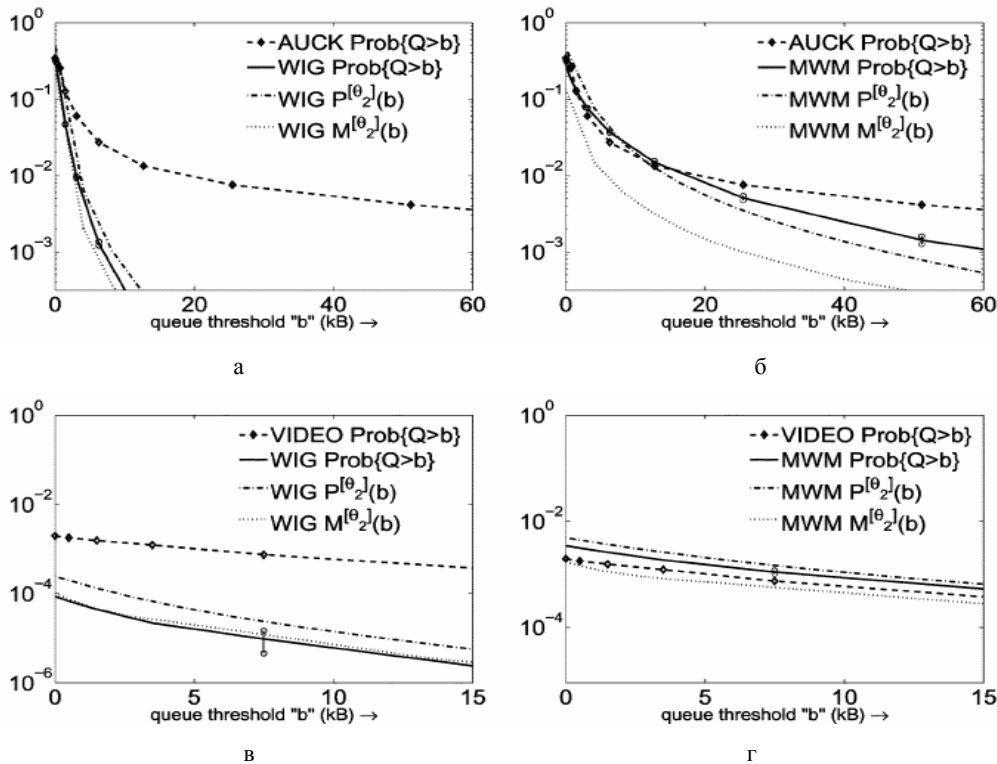


Рис. 5. Производительность очередей реального и синтетического трафика для НГМОВ и МФВМ моделей при невысоком коэффициенте использования канала: а – АУСК и НГМОВ; б – АУСК и МФВМ; в – VIDEO и НГМОВ; д – VIDEO и МФВМ

### 3.3. Интерпретация при использовании аппроксимации произведения

Принимая аппроксимацию произведения  $P^{[\theta_\alpha]}(b_k)$  как близкую аппроксимацию к реальной вероятности хвоста очереди, что открывает механизм влияния распределения на размер очередей. В случае трафика VIDEO, проявляющего намного более близкие распределения к гауссовским (рис. 5), модели НГМОВ и МФВМ ведут себя сходным образом при высоком коэффициенте использования канала, тогда как при низком коэффициенте модель МФВМ превосходит НГМОВ. Это легко объясняется согласно исследованиям, приведенным в [5], как тот факт, что статистические характеристики трафика в небольших масштабах времени влияют на процесс организации очередей в большей степени, чем при больших масштабах времени, касаясь низкого коэффициента использования канала. Поскольку маргиналии в небольших масштабах времени для трафика VIDEO являются преимущественно негауссовскими, чем при больших масштабах, очевидно, что модель МФВМ более справедлива, чем НГМОВ при невысоком коэффициенте использования канала.

### Выводы

В данной статье проведены исследования необходимой точности и вычислительной мощности, требуемой для вычисления аппроксимации максимума, и установлено, что экспоненциальные вре-

менные шкалы являются оптимальными для ФБД трафика в смысле согласования.

Эксперименты показали влияние хвостов распределений в различных масштабах времени на процесс организации очередей. Наблюдается, что при негауссовских трафиковых сценариях корреляционная структура (краткосрочная и долгосрочная) описывает поведение очередей недостаточно адекватно.

В качестве дальнейших исследований необходимо решить такие задачи. Во-первых, на основе разработанного многошкального анализа организаций очередей можно предположить, что многошкальная парадигма может улучшить качество анализа комплексных систем, состоящих из множества очередей с произвольными дисциплинами обслуживания.

Во-вторых, здесь опущен случай очередей конечной длины, в которых происходят отбрасывания пакетов. Таким образом, представленные результаты являются более полезными для прогнозирования задержек постановки пакетов в очередь, чем потерь пакетов.

В-третьих, приведенный анализ справедлив для разомкнутых моделей трафика, тогда как реальный трафик Интернет преимущественно состоит из замкнутого TCP трафика. Замкнутый трафик реагирует на изменения условий в сети иным образом [15]. Например, в отличие от разомкнутого трафика, замкнутый трафик будет уменьшать заявленную загрузку при уменьшении скорости на критическом

участке маршрута. Следовательно, использовать результаты для разомкнутых моделей при трафике Интернет можно только при уверенности, что нет влияния на свойства сети (задержки и потери), значительно влияющих на TCP трафик. Возможные приложения разомкнутых моделей существуют для инициализации магистралей Интернет (для получения низких задержек/потерь) и обычно в сетях с преобладающим разомкнутым трафиком, например, когда приложения используют потоки трафика протоколом UDP.

### Список литературы

1. Crovella M. Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes / M. Crovella, A. Bestavros // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1997. – Vol. 5. – P. 835-846.
2. Erramilli A. Experimental Queuing Analysis with Long-Range Dependent Traffic / A. Erramilli, O. Narayan, W. Willinger // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1996. – № 7. – P. 135-141.
3. Willinger W. Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level / W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, D.V. Wilson // *ACM SIGCOMM'91*. – 1991. – P. 149-157.
4. Leland W. On the self-similar nature of IP-traffic / W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1997. – № 3. – P. 423-431.
5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Г.А. Кучук, А.А. Можяев, Р.Э. Пащенко и др. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.
6. Воробйов О.В. Моделирование самоподобного трафика синтезом ансамбля стохастических квазипериодических джерел та ON/OFF моделі / О.В. Воробйов // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2006. – 3 (7). – С. 97-105.
7. Кучук Г.А. Аналіз та моделі самоподобного трафіка / Г.А. Кучук, О.О. Можяєв, О.В. Воробйов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 9 (35). – С. 173-180.
8. Можяев О.О. Моделирование трафика телекоммуникационных сетей на базе масштабной инвариантности / О.О. Можяев // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 6 (12). – С. 79-82.
9. Можяев А.А. Оценка достоверности определения параметров телекоммуникационного трафика / А.А. Можяев // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 9 (58). – С. 53-55.
10. Кучук Г.А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети / Г.А. Кучук, А.А. Можяев // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2007. – № 8 (27). – С. 261-271.
11. Papagiannaki K. Analysis of measured single-hop delay from an operational backbone network / K. Papagiannaki, S. Moon, C. Fraleigh, P. Thiran, F. Tobagi, C. Diot // *Proc. IEEE INFOCOM*. – Jun. 2002. – P. 535-544.
12. Breslau L. Comments on the performance of measurement-based admission control / L. Breslau, S. Jamin, S. Shenker // *Proc. IEEE INFOCOM*. – Mar. 2000. – P. 1233-1242.
13. Fraleigh C. Provisioning IP backbone networks to support latency sensitive traffic / C. Fraleigh, F. Tobagi, C. Diot // *Proc. IEEE INFOCOM*. – Apr. 2003. – P. 375-385.
14. Norros I. A storage model with self-similar input / I. Norros // *Queueing Syst.* – 1994. – Vol. 16. – P. 387-396.
15. Duffield N. Large deviations and overflow probabilities for the general single-server queue, with applications / N. Duffield, N.O'Connell // *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.* – 1995. – Vol. 118. – P. 363-374.
16. Hüsler J. Extremes of a certain class of Gaussian processes / J. Hüsler, V. Piterbarg // *Stochastic Process. Appl.* – 1999. – Vol. 83. – P. 257-271.
17. Neidhardt A.L. The concept of relevant time scales and its application to queueing analysis of self-similar traffic / A.L. Neidhardt, J.L. Wang // *Proc. ACM SIGMETRICS*. – Mar. 1998. – P. 222-232.

Поступила в редколлегию 12.11.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### АСИМПТОТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЧЕРГ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Г.А. Кучук, О.О. Можяєв, А.А. Коваленко

Розглянуті питання асимптотичного дослідження черг у високошвидкісних телекомунікаційних мережах і визначені межі пропонованих модельних апроксимацій. Проведені дослідження, що дозволяють визначити необхідну точність і обчислювальну потужність, які потрібні для обчислення апроксимації максимуму. Встановлено, що експоненціальні тимчасові шкали є оптимальними для трафіку фрактального броунівського руху в сенсі узгодження. Проведені експерименти показали вплив хвостів розподілів в різних масштабах часу на процес організації черг. Спостерігається, що при негаусівських трафікових сценаріях кореляційна структура (короткострокова і довгострокова) описує поведінку черг недостатньо адекватно. У зв'язку з цим визначені напрями подальших досліджень.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, асимптотичний аналіз, негаусівський процес, фрактальний броунівський рух, фрактальний гаусівський шум, мультифрактальна вейвлет-модель.

### ASYMPTOTIC QUEUING OF HIGH-SPEED TELECOMMUNICATIONS NETWORKS ANALYSIS

G.A. Kuchuk, A.A. Mozhaev, A.A. Kovalenko

The questions of asymptotic research of turns are considered in the high-speed networks of telecommunications and the scopes of the offered approximations of models are certain. Researches, allowing to define necessary exactness and calculable power, are conducted, which are required for the calculation of approximation of maximum. It is set that exponential temporal scales are optimum for the traffic of fractal brownian motion in sense of concordance. The conducted experiments showed influencing of tails of distributing in different time scale factors on the process of discipline of queues. Observed, that at non-Gaussian traffic scenarios a correlation structure (short-term and long-term) describes the conduct of turns it is not enough adequately. Directions of further researches are certain in this connection.

**Keywords:** telecommunication network, asymptotic analysis, non-Gaussian process, fractal brownian motion, fractal Gaussian noise, multifractal weivlet-model.