*УДК 621.395*

*Ложковский А.Г.*
*Ложковський А.Г.*
*Loshkovskiy A.G.*

## МОДЕЛЬ ТРАФИКА В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

## МОДЕЛЬ ТРАФІКА В МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖАХ З КОМУТАЦІЄЮ ПАКЕТІВ

## THE TRAFFIC MODEL IN THE MULTISERVICE PACKET SWITCHING NETWORKS

***Аннотация**. В статье рассмотрены математические модели, позволяющие адекватно описывать трафик мультисервисных сетей с коммутацией пакетов, обладающий свойством пачечности.*

***Анотація**. В статті розглянуто математичні моделі, що дозволяють адекватно описувати трафік мультисервісних мереж з комутацією пакетів, який має властивості пачковості.*

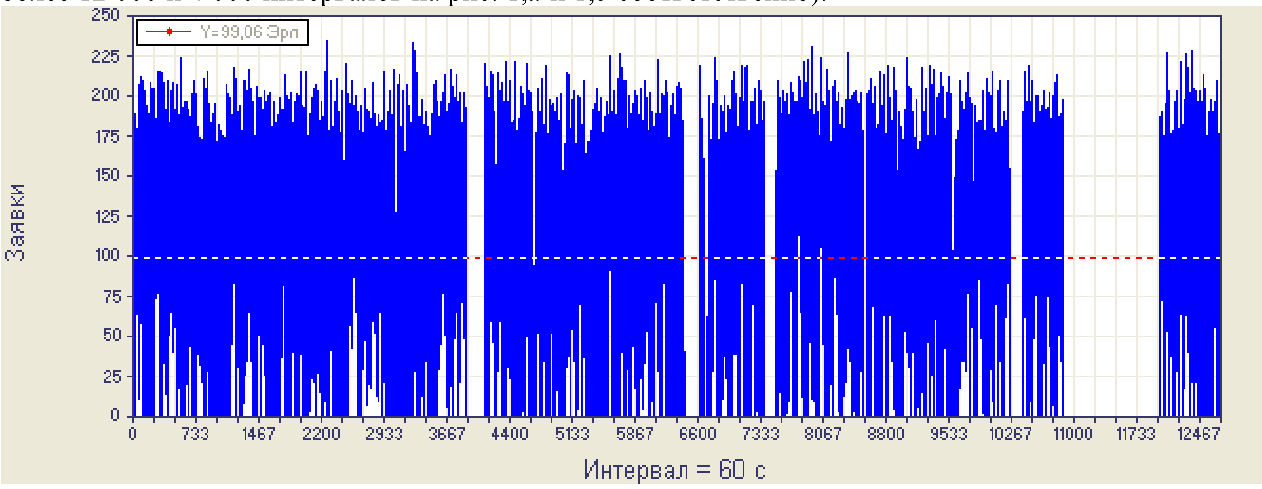
***Summary**. The mathematical models, permitting adequately to describe of traffic in multiservice packet switching networks, which possessed property of burstness, is considered.*

Для решения проблем анализа и синтеза (проектирования) телекоммуникационных систем необходимо располагать соответствующими моделями и инженерными методами, позволяющими на основе данных измерений оценивать качество предоставления услуг и прогнозировать характеристики их работы. Для этого, как правило, применяется теория систем массового обслуживания (СМО). СМО – это математическая модель системы, предназначенной для обслуживания поступающих через случайные интервалы времени заявок, длительность обслуживания которых также случайна. Основное место в общей математической модели СМО занимает модель входящего потока заявок, поступающих в систему на обслуживание (модель трафика). От правильного выбора этой модели зависит точность расчета основных характеристик СМО, характеризующих работу системы в целом. Поскольку в мультисервисных пакетных сетях связи информационные потоки могут иметь постоянную, переменную и смешанную битовую скорость, то математическая модель потока становится очень сложной. Однако из-за отсутствия адекватных моделей трафика таких сетей иногда для анализа и синтеза упрощенно и со значительной потерей точности используют пуассоновскую модель трафика [1, 7].

Цель данной статьи состоит в обосновании более приемлемых математических моделей, полученных на основе результатов измерений и имитационного моделирования параметров потоков заявок на обслуживание.

В пакетных мультисервисных сетях связи потоки пакетов (трафик) существенно отличаются от модели пуассоновского потока, описываемого экспоненциальной функцией распределения интервала времени между моментами поступления пакетов. Здесь потоки пакетов формируются множеством источников запросов на предоставляемые сетью услуги и сетевыми приложениями, обеспечивающими услуги передачи видео, данных, речи и др. Источники запросов, участвуя в процессе создания потока пакетов, существенно отличаются между собой значениями удельной интенсивности нагрузки. Интенсивность нагрузки результирующего потока пакетов в каждый момент времени зависит от того, какими приложениями обслуживаются источники запросов и каково соотношение их численности для различных приложений. На структуру трафика также оказывают влияние и технологические особенности применяемых алгоритмов обслуживания. Например, если услуга обеспечивается несколькими приложениями, то моменты возникновения запросов на установление сеансов связи сильно коррелированны или если в используемых протоколах применяется повторная передача неверно принятых пакетов. Из-за этого в процессе обслуживания исходные потоки претерпевают значительные изменения и в итоговом трафике появляются долгосрочные зависимости в интенсивности поступления пакетов. Таким образом, трафик уже не является простой суммой множества независимых стационарных и ординарных потоков, что свойственно пуассоновским потокам телефонных сетей связи. В мультисервисных сетях с коммутацией пакетов трафик является разнородным, а потоки разных приложений требуют обеспечения определенного уровня качества обслуживания. В этих условиях передачу потоков всех приложений обеспечивает единая мультисервисная сеть с общими протоколами и законами управления, несмотря на то, что источники каждого приложения имеют разные скорости передачи информации или изменяют её в процессе сеанса связи (максимальная и средняя скорости). Из-за этого объединенному потоку пакетов свойственна так называемая „пачечность” (*burstness*) трафика со случайной периодичностью и продолжительностью пиков нагрузки.

На основании статистических данных о количестве и размерах передаваемых пакетов, характеристик интервалов времени между пакетами в течение установленного соединения (сеанса связи), данных о длительностях устанавливаемых соединений и т.д. можно составить математическую модель реального трафика. На рис.1 представлены результаты измерений параметров трафика пакетной мультисервисной сети. Здесь показано количество заявок на установление соединения и пакетов в сеансах связи по фиксированным интервалам времени 60 и 1,5 с (более 12 000 и 4 000 интервалов на рис. 1,*а* и 1,*б* соответственно).




*а*)


*б*)

Рисунок 1 – Статистические результаты измерений

Представленные данные свидетельствуют о том, что для мультисервисного трафика характерна сильная неравномерность интенсивности поступления заявок и пакетов. Заявки и пакеты не плавно рассредоточены по различным интервалам времени, а группируются в «пачки» в одних интервалах, и полностью отсутствуют или их очень мало в иных интервалах времени (например, рис. 1,*а*). Из-за этого в пачечном трафике при сравнительно небольшом среднем значении интенсивности поступления пакетов (интенсивность трафика) присутствует достаточное количество относительно больших выбросов. Например, для трафика, представленного на рис.1,*б*, среднее значение составляет 4,1 пакета на интервал в 1,5 с (показано штриховой линией), а отдельные выбросы достигают значений до 20 и более пакетов на интервал. Согласно «правилу трех сигм» для пуассоновского потока с вероятностью $P = 0{,}99$ для этого случая выбросы могли бы достигать только 10 пакетов на интервал. На рис.1,*а* при среднем значении 99 заявок на интервал есть выбросы до 200 и более, а для пуассоновского потока они могли бы достигать только 130.

Эффективность обслуживания такого трафика очень низка, поскольку в процессе его обработки для обеспечения заданного уровня потерь (качества обслуживания) необходимо увеличивать пропускную способность каналов. При этом в периоды спада пиков нагрузки ресурсы системы очень сильно недоиспользуются (как правило, проектирование пропускной способности каналов ведется в расчете на среднее значение интенсивности трафика).

Случайный процесс поступления в систему заявок (пакетов) характеризуется законом распределения, устанавливающим связь между значением случайной величины и вероятностью появления этого значения. Такой поток может быть описан вероятностной функцией распределения интервалов времени между соседними заявками или вероятностной функцией распределения количества заявок за условную единицу времени [1]. В математической модели, описывающей пуассоновский поток заявок, длительность интервала времени между заявками $Z$ распределена по экспоненциальному закону, для которого математическое ожидание рассматриваемой величины $M_z = 1 / \lambda$, а дисперсия $D_z = 1 / \lambda^2$, где $\lambda$ – параметр потока. Известно, если интервалы времени между событиями (заявками) имеют экспоненциальное распределение, то количество таких событий в условную единицу времени однозначно подчинено распределению Пуассона.

Результаты исследований показали, что функция распределения интервалов времени между поступлениями пакетов не согласуется с экспоненциальным распределением (рис. 2).

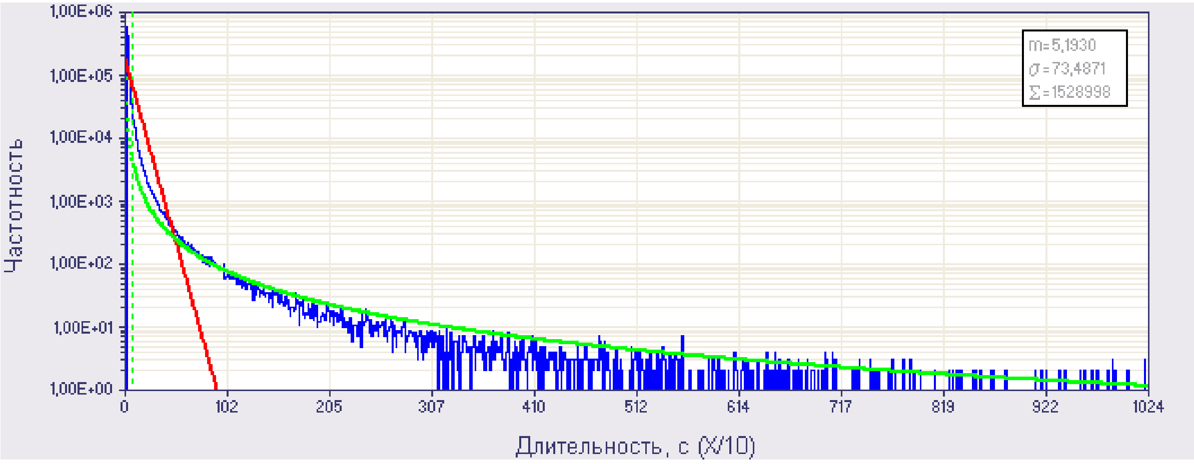



Рисунок 2 – Аппроксимация интервала времени между заявками

Графики, приведенные на рис. 2, подтверждают, что результаты статистической обработки данных измерений согласуются не с функцией экспоненциального распределения (на графике эта функция показана в виде прямой линии по причине логарифмической шкалы), а с функциями, имеющими так называемый „длинный хвост”, гораздо более весомый, чем у экспоненциального распределения. При этом хорошие результаты аппроксимации гистограмм реальных измерений получаются при использовании функций логарифмически нормального закона распределения, распределения Парето и Вейбулла. В некоторых случаях для этой цели можно использовать гамма-распределение или гипер-экспоненциальное (смесь нескольких экспонент) распределение. Иногда достаточно гиперэкспоненциального распределения второго порядка:

$$p(z) = p_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + p_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}. \qquad (1)$$

Это значит, что с вероятностью $p_1$ интервал времени между пакетами имеет экспоненциальное распределение с параметром $\lambda_1$, а с вероятностью $p_2$ – с параметром $\lambda_2$ (естественно, $p_1 + p_2 = 1$). При этом достигаются большие разбросы величины интервала времени между пакетами, что обеспечивает лучшее согласие данной модели с реальными потоками.

„Длинный хвост” обозначает, что, например, при экспоненциальном распределении вероятность существования интервала времени между заявками длительностью 2500 мс равна $P_{2500} = 1{,}4 \cdot 10^{-13}$, а при логарифмически нормальном – $P_{2500} = 8{,}3 \cdot 10^{-7}$, т.е. значительно больше эта вероятность. Следовательно, такие очень длинные интервалы времени в процессе поступления заявок (формирования трафика) существуют и их доля высока. Именно распределения с „длинным хвостом” позволяют обосновать „пачечность” трафика, если есть достаточно длительные интервалы времени, на которых нет ни одной заявки, то чтобы „выдержать” общее среднее количество заявок (интенсивность трафика), на других интервалах времени эти заявки „компенсируются” очень большим количеством (см. рис. 1).

Большая неравномерность поступления заявок (пакетов) характеризуется коэффициентом вариации длительности интервала времени между заявками $VarZ$ (отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию длительности интервала $Z$). Для потока с экспоненциальным распределением $VarZ = 1$, а в реальных потоках коэффициент вариации достигает значений нескольких десятков. Экспоненциальное распределение интервалов времени между заявками приводит к пуассоновскому распределению интенсивности трафика $Y$ (количества заявок на единицу времени). Для пуассоновского потока отношение дисперсии интенсивности трафика $\sigma^2$ к ее математическому ожиданию $Y$ также равно единице. С увеличением $VarZ$ отношение первых двух центральных моментов интенсивности трафика, определяющих пик-фактор (скученность) интенсивности трафика

$$S = \frac{\sigma^2}{Y}, \tag{2}$$

также увеличивается. По результатам статистического моделирования, выполненном при помощи имитационной модели [2], установлено, что в случае гиперэкспоненциального распределения промежутка времени между заявками коэффициент вариации длительности промежутка времени $VarZ$ и пик-фактор интенсивности трафика $S$ находятся в следующей зависимости:

$$(VarZ)^2 = \left(\frac{\sigma_Z}{M_Z}\right)^2 = S. \tag{3}$$

Кроме того, гиперэкспоненциальное распределение промежутка времени между заявками приводит к нормальному распределению количества заявок на интервале времени, равном средней длительности обслуживания этих заявок. Статистическая обработка результатов измерений параметров трафика в мультисервисных сетях и исследование его математической модели также подтверждают, что реальное распределение интенсивности нагрузки лучше согласуется с нормальным (Гаусса) законом распределения [3].

Для случая трафика с пик-фактором $S > 1$ решение проблемы расчета характеристик качества обслуживания такого неравномерного потока дано в [4–6]. Однако, как показали результаты исследования, в случае „пачечного” трафика эти решения не подходят.

Нормальное распределение является симметричным, при котором математическое ожидание интенсивности трафика $Y$ и его дисперсия $\sigma^2$ являются исчерпывающими характеристиками протекания процесса формирования потока заявок. Основные характеристики случайного процесса $Y$ и $\sigma^2$, являясь весьма важными, в то же время не являются исчерпывающими, а иногда и бесполезными для прогнозирования значения случайной величины. Возможны варианты, когда случайные процессы характеризуются одинаковыми значениями математического ожидания и дисперсии, но внутренняя структура этих процессов различна. Одни могут иметь плавно меняющиеся реализации, а иные – ярко выраженную колебательную структуру при скачкообразном изменении отдельных значений случайной величины (например, резкое возрастание количества пакетов в сети, приводящее к „пачечности – *burstness*” трафика). Для «плавных» процессов характерна большая предсказуемость реализаций, а для «пачечных» – очень малая вероятностная зависимость между двумя случайными величинами СП.

Как показали исследования, для потоков трафика с распределением интервалов времени между пакетами с логарифмически нормальным законом и законом Парето, функция распределения количества заявок (пакетов) на единицу времени (интенсивность) имеет явно выраженную положительную асимметрию, что и продемонстрировано на рис. 3.

Для приведенного на рис. 3 случая интенсивности трафика $Y = 130$ Эрл видно, что аппроксимация данной статистики нормальным законом распределения (штриховая линия) с математическим ожиданием $Y = 130$ и $\sigma^2 = 2025$ не согласуется с реальным распределением трафика. При этом пик-фактор интенсивности трафика $S = \sigma^2 / Y =$ 15,6. Из рисунка видно, что реальное распределение имеет существенную асимметрию по сравнению с нормальным законом и большую долю (частотность) интервалов, на которые приходилось „ноль заявок”, т.е. на них нет ни одной заявки. Именно эта вероятность „нулевого состояния” и приводит к столь значительной асимметрии распределения в целом.

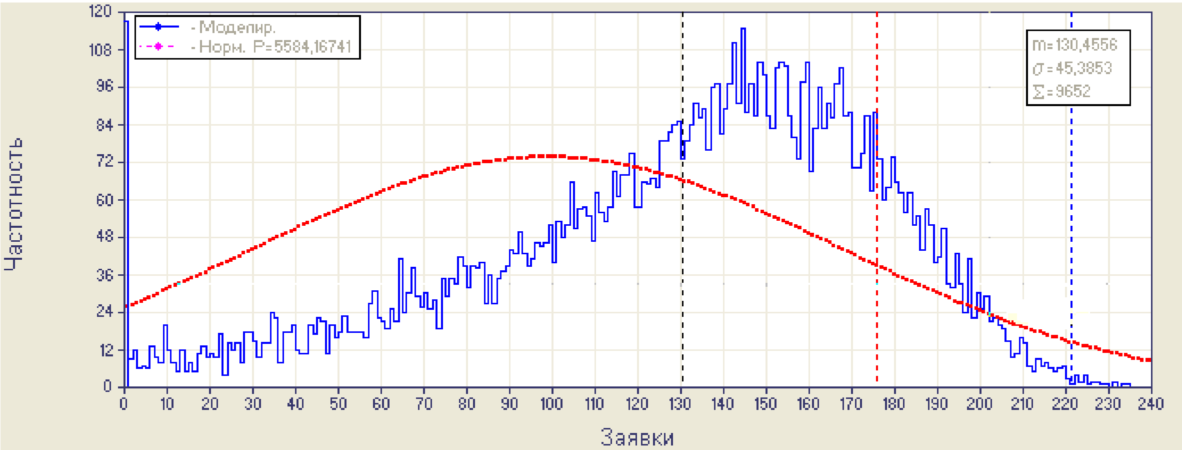



Рисунок 3 – Распределение количества заявок за интервал времени

Трафик, которому свойственна „пачечность”, принято считать трафиком, обладающим эффектом самоподобности [7]. В работе [8] предложен соответствующий метод расчета характеристик качества обслуживания такого трафика. Он основан на том, что в тех точках, где совпадает энтропия распределения состояний системы, совпадают и исследуемые параметры качества обслуживания, такие как, например, средняя длина очереди и средняя длительность ожидания всех пакетов (ожидающих и обслуживаемых без ожидания). И поэтому для расчета характеристик QoS одноканальной системы массового обслуживания с очередью для случая обслуживания трафика, обладающего эффектом самоподобия, в точках, где близки значения энтропии распределения состояний системы, можно применять формулу Поллачека-Хинчина, справедливой для модели M/G/1. Однако этот метод пригоден только для одноканальных систем, а для многоканальных систем обслуживания „пачечного” трафика адекватных методов расчета характеристик системы пока неизвестно.

В заключение следует отметить, что точность расчета телекоммуникационных систем в значительной мере зависит от правильной оценки модели потока заявок, обслуживаемого этой системой. Выбранная модель и соответствующий ей метод расчета должны быть адекватными реальному трафику телекоммуникационных сетей. Более адекватной моделью потоков в мультисервисных сетях с коммутацией пакетов являются перечисленные в работе вероятностные функции распределения интервалов времени между заявками (пакетами), обладающие „длинным хвостом”. Хотя исследование характеристик качества обслуживания в этих условиях является очень сложной математической задачей, однако её решение возможно, если при расчетах учитывать не только математическое ожидание и дисперсию интенсивности трафика, но и моменты распределений высшего порядка, таких как асимметрия.

***Литература***


1. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания; пер. с англ. / *Клейнрок Л.* – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с., ил.
2. *Ложковский А.Г.* Статистическое моделирование полнодоступного пучка с потерями / *А.Г. Ложковский* // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – №1. – С. 75-82.
3. *Ложковский А.Г.* Экспериментальная оценка модели потока вызовов на современных телефонных сетях / А.Г. Ложковский, Н.В.Захарченко, С.М. Горохов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2001. – №2. – С. 40-43.
4. *Захарченко Н.В.* Методы расчёта телекоммуникационного оборудования в условиях реального потока вызовов / Н.В.Захарченко, А.Г. Ложковский // Вісник українського Будинку економічних та наукових знань. – К.: 2004. – №4. – С. 102–109.
5. *Ложковский А.Г.* Расчет характеристик QoS в одноканальной системе с непуассоновским трафиком / А.Г. Ложковский // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип. 54. – К.: 2009. – С.154-160.
6. *Ложковский А.Г.* Метод расчета систем обслуживания с ожиданием при произвольном потоке вызовов / А.Г. Ложковский // Зв’язок. – 2006. – №1. – С. 57–60.
7. *Крылов В.В., Самохвалов С.С.* Теория телетрафика и её приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.: ил.
8. *Ложковский А.Г.* Оценка параметров качества обслуживания самоподобного трафика энтропийным методом / А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С.57–62.