

Стохастические системы

© 2025 г. Б.Я. ЛИХТЦИНДЕР, д-р техн. наук (b.lihtcinder@psuti.ru)
(Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара),

А.Ю. ПРИВАЛОВ, д-р техн. наук (privalov1967@gmail.com)
(Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева;
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики)

ГРУППОВЫЕ КВАЗИПУАССОНОВСКИЕ МОДЕЛИ В АНАЛИЗЕ ОЧЕРЕДЕЙ ПАЧЕЧНОГО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФИКА¹

Предложен новый тип входного потока для системы массового обслуживания, родственный групповому пуассоновскому потоку. Показано, что предлагаемый поток является более адекватной моделью современного трафика, чем групповой пуассоновский поток при определении зависимости средней очереди в приемном буфере от загрузки исходящего канала передачи данных (на примере трафика видеокodeка стандарта H264). Предложена аналитическая формула для размера средней очереди в СМО G/D/1 с таким входным потоком, что позволяет оценивать параметры модели для приближения средней очереди реального трафика методом наименьших квадратов. Также показана возможность использовать для оценки параметров модели нейросеть.

Ключевые слова: неординарный входной поток, система массового обслуживания, телекоммуникационный трафик, имитационное моделирование, нейронная сеть.

DOI: 10.31857/S0005231025100068

1. Введение

Одна из самых распространенных задач анализа и моделирования трафика сетей телекоммуникаций – это определение характеристик очереди, создаваемой этим трафиком в приемном буфере сетевого узла. При этом совпадение статистических характеристик самого модельного трафика с его реальным прототипом не так важно, как совпадение статистических характеристик соответствующих очередей.

Для сетей передачи данных с коммутацией пакетов классические пуассоновские модели потоков не являются адекватными. В то же время описание сложных коррелированных потоков с использованием самоподобных процессов, привлекавшее в последние два десятилетия большое внимание научного сообщества, позволяет отразить сложные корреляционные свойства самого трафика, но неудобно при анализе характеристик очередей.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке из средств государственного задания в сфере научной деятельности (проект FSSS-2024-0014).

Хорошо зарекомендовавшей себя альтернативой такому подходу является класс моделей потоков, управляемых цепью Маркова и близких к ним. Этапы развития указанных моделей представлены в обзоре [1]. От «разносторонних (versatile) потоков», через «N-потоки» (потоки Ньютса) [2] они эволюционировали до марковских входных потоков (МАР – Markov Arrival Process) и их обобщения – групповых марковских входных потоков (ВМАР – Batch Markov Arrival Process) (см., например, [3–5]).

В данной работе, на основе модели группового пуассоновского потока, который может рассматриваться как модель, родственная к ВМАР, предлагается обобщение группового пуассоновского потока, а именно квазипуассоновский поток, у которого полученная в имитационном эксперименте зависимость средней очереди в приемном буфере от загрузки прибора хорошо аппроксимирует эту зависимость у трафика видеокodeка H264.

При этом для определения параметров предложенной модели будет использоваться обобщение формулы Поллачека–Хинчина для системы массового обслуживания (СМО) G/D/1, полученное с помощью интервального метода [6]. Для предлагаемого квазипуассоновского потока с использованием этой формулы будет выведена полуэмпирическая формула для зависимости средней очереди в СМО G/D/1 от загрузки прибора, хорошо согласующаяся с результатами имитационного моделирования.

Также будет показана возможность определения параметров такого квазипуассоновского потока с помощью нейросети.

2. Постановка задачи и краткое описание полученных ранее результатов

Сформулируем полученные авторами ранее результаты, которые будут использоваться далее.

Рассмотрим пуассоновский поток событий с параметром λ , в котором каждое событие представляет собой одновременное прибытие нескольких заявок на обслуживание (пачки заявок). Количество заявок в каждой пачке являются независимыми одинаково распределенными дискретными случайными величинами. Такой поток называется *групповым (неординарным) пуассоновским потоком* ([7]). Он очевидно обладает свойством стационарности и отсутствия последействия, но не обладает свойством ординарности.

Обозначим величину k -й пачки заявок через B_k , и будем считать, что нам задано ее распределение:

$$Pr\{B_k = n\} = b_n \forall k.$$

Рассмотрим случайный интервал на оси времени длиной τ . Дальнейшей задачей будет найти моменты случайной величины $m(\tau)$, равной количеству заявок группового пуассоновского потока, приходящих в таком интервале. Для решения задачи найдем производящую функцию случайной величины $m(\tau)$. Если производящая функция количества заявок в пач-

ке есть $G_B(z) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n z^n$, то для производящей функции $G_{m(\tau)}(z)$ имеем (подробнее см. [8]):

$$G_{m(\tau)}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\lambda\tau} \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} (G_B(z))^k = e^{\lambda\tau(G_B(z)-1)},$$

откуда для математического ожидания и дисперсии $m(\tau)$ несложно получить

$$M(m(\tau)) = \lambda\tau\overline{B}, \quad D(m(\tau)) = \lambda\tau\overline{B^2}.$$

Для случая, когда пакеты имеют одинаковый размер B (этот случай далее понадобится), получаем:

$$M(m(\tau)) = \lambda\tau B, \quad D(m(\tau)) = \lambda\tau B^2.$$

Пусть теперь этот групповой пуассоновский поток является входным в СМО G/D/1 со временем обслуживания заявки τ_S . Найти моменты очереди (в принципе – любого порядка) в такой СМО можно с помощью интервального метода (см. [8], где представлен вывод формул для первого и второго порядка, а в [9] представлено обобщение на случай, когда время обслуживания заявки в СМО является дискретной случайной величиной с конечным числом значений). Но здесь понадобится только формула для математического ожидания при детерминированном времени обслуживания, которая задается обобщенной формулой Поллачека–Хинчина и имеет вид

$$(1) \quad \overline{Q}(\rho) = \frac{D(m(\tau_S)) + 2R(Q_i, m_{i+1}(\tau_S))}{2(1 - \rho)} - \frac{\rho}{2},$$

где ρ – загрузка прибора, $D(m(\tau_S))$ – дисперсия количества заявок, приходящих за время обслуживания одной заявки, $R(Q_i, m_{i+1}(\tau_S))$ – корреляционный момент между длиной очереди в момент окончания обслуживания некоторой заявки и количеством заявок, приходящим на следующем интервале обслуживания (значения всех величин берутся для данного ρ).

В общем случае использование данной формулы затруднительно из-за необходимости вычислять $R(Q_i, m_{i+1}(\tau_S))$, но для некоторых важных частных случаев это возможно. В частности, для группового пуассоновского потока $R(Q_i, m_{i+1}(\tau_S)) = 0$ из-за отсутствия последействия и с использованием того, что для пакетов постоянного размера имеем

$$M(m(\tau_S)) = \lambda\tau_S B = \rho, \quad D(m(\tau_S)) = \lambda\tau_S B^2 = \rho B,$$

получаем

$$(2) \quad \overline{Q}(\rho) = \frac{\rho B}{2(1 - \rho)} - \frac{\rho}{2} = \frac{\rho B - \rho(1 - \rho)}{2(1 - \rho)}.$$

Нетрудно видеть, что для $B = 1$ получается классическая формула Поллачека–Хинчина для СМО M/D/1.

В [10] групповой пуассоновский поток был использован для аппроксимации методом наименьших квадратов двух первых статистических моментов очереди трафика видеокodeка стандарта H264 и показал результаты лучше, чем ординарный пуассоновский поток. Однако все-таки это приближение (полученное методом наименьших квадратов относительно размера пачки как параметра модели) нельзя признать достаточно хорошим. Поэтому в данной работе рассмотрим новую модель потока, которую будем использовать для той же цели.

Рассмотрим следующий поток заявок: заявки прибывают пачками, количество заявок в каждой пачке являются независимыми одинаково распределенными дискретными случайными величинами B_k . Интервалы времени между моментами прибытия последовательных пачек равны сумме некоторой постоянной величины T и независимой экспоненциально распределенной случайной величины с параметром λ . Будем называть такой поток *квазипуассоновским потоком с одинаковыми паузами продолжительностью T* (для краткости – просто *квазипуассоновским потоком*).

Задача будет состоять в том, чтобы, используя этот поток как входной в СМО G/D/1, приблизить среднюю очередь, создаваемую реальным трафиком (в качестве которого будем по-прежнему использовать трафик видеокodeка стандарта H264).

Так как нас будет интересовать зависимость средней очереди от загрузки прибора, а временной масштаб не важен, будем характеризовать квазипуассоновский поток двумя параметрами: параметром B – постоянным размером пачки и параметром $\alpha = T\lambda$, т.е. отношением длины постоянной части интервала между прибытиями (паузы) к средней длине экспоненциально-распределенной части этого интервала. Эти параметры подбираются таким образом, чтобы при одинаковых загрузках прибора различие между средней очередью реального трафика и средней очередью квазипуассоновского потока было как можно меньше.

Точного решения этой задачи получить не удалось, но в следующем разделе представим приближенную формулу для средней очереди такого потока.

3. Приближение для средней очереди квазипуассоновского потока

Прежде всего отметим следующее установленное эмпирически свойство квазипуассоновского потока: при любом конечном α и постоянном размере пачки B выборочная дисперсия количества заявок, приходящих на случайном интервале τ , близка к выборочной дисперсии группового пуассоновского потока с тем же B при условии, что они создают одну и ту же загрузку прибора ρ в СМО G/D/1.

При установлении этого свойства (а также и в других имитационных экспериментах в данной работе) использовалась программная имитационная модель указанных потоков, которая генерировала последовательность моментов прибытия пачек заявок согласно определению соответствующего потока.

В дальнейших экспериментах этот поток пачек заявок будет входным для имитационной модели СМО G/D/1. Здесь же нужно было только для имеющегося потока определить постоянное время обслуживания заявки такое, чтобы загрузка прибора имела бы заданное значение (использовались значения из диапазона $[0,1\ 0,9]$, наиболее на практике интересного).

В экспериментах, где наблюдался указанный выше факт близости выборочных дисперсий у групповых пуассоновского и квазипуассоновских потоков, бралось $\tau = \tau_S$ – т.е. интервал, за который определялось количество приходящих заявок, брался равным времени обслуживания одной заявки в СМО G/D/1 при заданном ρ . Эти интервалы плотно покрывали всю временную ось, и по полученной выборке количества пришедших в них заявок вычислялась выборочная дисперсия $\hat{D}(\rho)$ по формуле

$$\hat{D}(\rho) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{m}_n^2(\tau_S) - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{m}_n(\tau_S) \right)^2,$$

где элемент выборки $\hat{m}_n(\tau_S)$, $n = 1, \dots, N$, – это количество заявок, пришедших в n -м интервале τ_S при прогоне имитационной модели.

В таблице для примера приведены полученные с помощью имитационного моделирования значения выборочных дисперсий количества заявок, приходящих за время обслуживания одной заявки для группового пуассоновского и групповых квазипуассоновских потоков с разными α .

Выборочные дисперсии приходов для различных групповых потоков. Для всех $B = 20$

Загрузка	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Пуассон	2,00	4,00	6,00	8,00	10,03	12,05	14,05	16,06	17,96
Квази $\alpha = 0,5$	1,99	3,97	5,91	7,84	9,75	11,64	13,51	15,36	17,19
Квази $\alpha = 1$	1,99	3,96	5,91	7,84	9,74	11,63	13,50	15,35	17,18
Квази $\alpha = 2$	1,99	3,96	5,91	7,84	9,749	11,64	13,51	15,36	17,19

Причину наблюдаемой близости можно указать с помощью следующих (нестрогих) рассуждений: из определения квазипуассоновского потока следует, что интервал между последовательными приходами пачек всегда больше, чем величина паузы T , и если из каждого из этих интервалов вычитать T , то остатками будут независимые экспоненциально-распределенные величины. То есть поток, в котором интервалами между приходами пачек будут эти остатки, будет групповым пуассоновским потоком. Назовем его *вложенным потоком*. А исходный квазипуассоновский поток, таким образом, получается из вложенного, если после прибытия каждой пачки вставить *паузу* – интервал постоянной длины T , во время которого заявки не приходят.

На любом достаточно большом интервале времени вложенный пуассоновский поток в среднем будет занимать только $(1/(1 + \alpha))$ часть этого интерва-

ла, а остальную часть будут занимать паузы. Поэтому для того, чтобы вложенный поток создавал такую же загрузку прибора на всем интервале, какую создает групповой пуассоновский поток с тем же размером пачки, интенсивность приходов пачек во вложенном потоке должна быть в соответствующее число раз больше.

Для пуассоновского потока увеличение интенсивности означает и увеличение дисперсии количества приходящих пачек на некотором интервале времени во столько же раз. А чередование кусков реализации вложенного потока с интервалами пауз, как показал эксперимент, не вносит больших различий в выборочную дисперсию.

На основании близости значений этих выборочных дисперсий будем считать и теоретические дисперсии количества заявок, приходящих на интервале обслуживания одной заявки в СМО G/D/1 для пуассоновского и квазипуассоновского потоков, создающих одинаковую загрузку прибора, равными.

Далее оценим размер средней очереди от квазипуассоновского потока в СМО G/D/1 при малых нагрузках прибора. Что такое *малая нагрузка*, определим следующим образом: каждая пачка в квазипуассоновском потоке приходит перед началом интервала паузы длиной T и, если прибор свободен, начинает обслуживание в этом интервале. Будем называть нагрузку ρ малой, если при ней обслуживание пачки полностью заканчивается в течение этого интервала, т.е. выполняется условие

$$(3) \quad B \tau_S \leq T,$$

где τ_S – время обслуживания одной заявки из пачки. Границу интервала для малых ρ , которую обозначим через ρ_0 , можно вычислить следующим образом: из определения квазипуассоновского потока следует, что в среднем за время $T + 1/\lambda$ приходит B заявок, т.е. в среднем одна заявка на $(T + 1/\lambda)/B$ единиц времени. Тогда время обслуживания одной заявки при занятости прибора ρ должна быть

$$(4) \quad \tau_S = \rho \frac{T + 1/\lambda}{B},$$

и, учитывая (3), получаем

$$(5) \quad \rho_0 = \frac{T}{T + 1/\lambda} = \frac{\alpha}{\alpha + 1}.$$

Нетрудно видеть, что при малых нагрузках ситуация очень похожа на ситуацию в случае группового детерминированного потока (когда пачки приходят всегда через равные промежутки времени). И к ней, так же как к детерминированному потоку, можно применить обобщенную формулу Поллачека–Хинчина (это другой частный случай, когда это можно легко сделать). При этом используется следующее соображение:

$$R(Q_i, m_{i+1}(\tau_S)) = M(Q_i | m_{i+1}(\tau_S)) - M(Q_i) M(m_{i+1}(\tau_S)),$$

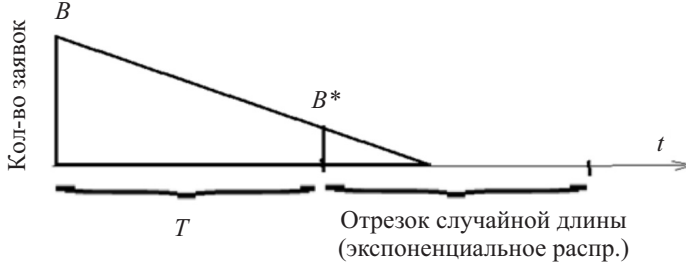


Рис. 1. Изменение количества заявок из пришедшей пачки в системе во время паузы при большой загрузке.

но Q_i отлична от нуля только в течение интервала паузы, в котором $m_{i+1}(\tau) = 0$, т.е.

$$R(Q_i, m_{i+1}(\tau_S)) = -M(Q_i) \quad M(m_{i+1}(\tau_S)) = -\bar{Q}(\rho) \rho,$$

и, подставив это в (1), получим

$$\bar{Q}(\rho) = \frac{D(m(\tau)) - 2\bar{Q}(\rho)\rho}{2(1 - \rho)} - \frac{\rho}{2},$$

откуда нетрудно получить

$$(6) \quad \bar{Q}(\rho) = \frac{\rho B - \rho(1 - \rho)}{2}.$$

Заметим, что при больших B зависимость $\bar{Q}$ от ρ близка к линейной.

Теперь рассмотрим приблизительную оценку очереди для больших загрузок ($\rho > \rho_0$).

В этом случае $B\tau_S > T$, и на момент начала экспоненциально-распределенной части интервала между пачками количество заявок из пачки, еще остающихся в системе, можно оценить как

$$(7) \quad B^*(\rho) = \left\lceil \frac{B\tau_S - T}{\tau} \right\rceil = \left\lceil B - \frac{T}{\tau_S} \right\rceil = \left\lceil B \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \right\rceil$$

где использовали (4), (5), а скобки $\lceil \dots \rceil$ означают наименьшее целое, больше либо равное выражению в них. Для иллюстрации на рис. 1 изображена зависимость количества заявок из пачки, остающихся в системе в течение соответствующей паузы, в начале которой эта пачка пришла. При этом у заявки, находящейся на обслуживании, учитывается ее не обслуженная еще часть.

То есть в момент окончания паузы размер необслуженной пачки будет меньше начального, и он будет зависеть от ρ . Если убрать из квазипуассоновского потока все паузы, “склеив” экспоненциально-распределенные интервалы, то получится групповой пуассоновский поток с размером пачки B^* .

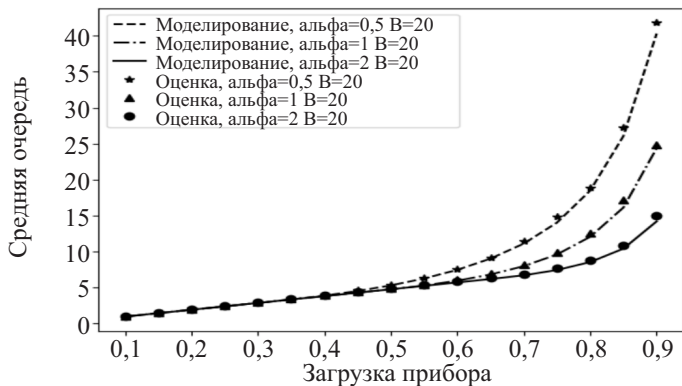


Рис. 2. Сравнение зависимости средней очереди от загрузки прибора, полученной в имитационном эксперименте и вычисленной по формуле (9). Для всех потоков $B = 20$.

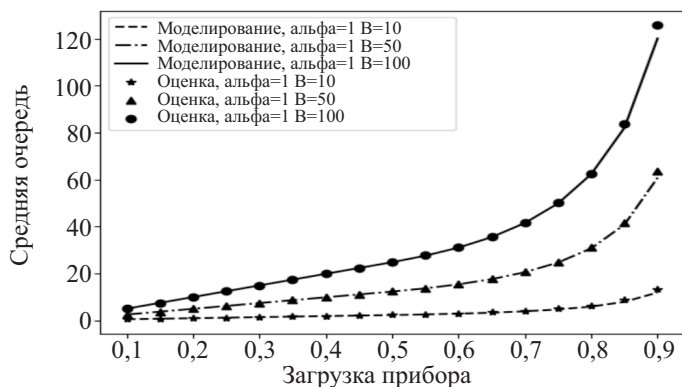


Рис. 3. Сравнение зависимости средней очереди от загрузки прибора, полученной в имитационном эксперименте и вычисленной по формуле (9). Для всех потоков $\alpha = 1$.

Для оценки можно считать, что очередь, образуемая таким пуассоновским потоком будет добавляться к очереди из (6). Эту добавочную очередь можно найти по формуле (2), только при этом в нее надо подставлять не ρ , а приведенное

$$(8) \quad \rho^* = \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0},$$

так как этот особый групповой пуассоновский поток появляется только при $\rho > \rho_0$, а при $\rho = 1$ должно быть и $\rho^* = 1$, чтобы очередь обращалась в бесконечность.

Также необходимо скорректировать то слагаемое в выражении для очереди, которое относится к участку паузы T , т.е. подобное выражению (6). Теперь обслуживание “хвоста” пачки размера B выходит за интервал T и учитывается в выражении пуассоновской части очереди, так что его надо ис-

ключить из (6). С учетом того, что средняя очередь пропорциональна площади фигуры на рис. 1, поправочный коэффициент можно найти как отношение площадей трапеции с основаниями B и B^* к треугольнику с катетом B (см. рис. 1):

$$\frac{S^*}{S} = \frac{\tau(B^2 - (B^*)^2)}{\tau B^2} = 1 - \frac{(B^*)^2}{B^2} \approx 1 - \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 = \left(2 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \frac{\rho_0}{\rho}.$$

Таким образом, имеем следующую формулу для очереди:

$$(9) \quad \bar{Q}(\rho) = \begin{cases} \frac{\rho B - \rho(1 - \rho)}{2}, & \rho \leq \rho_0; \\ \frac{\rho_0}{\rho} \left(2 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \left(\frac{\rho B - \rho(1 - \rho)}{2}\right) + \frac{\rho^* B^* - \rho^*(1 - \rho^*)}{2(1 - \rho^*)}, & \rho > \rho_0. \end{cases}$$

где B^* и ρ^* задаются формулами (7) и (8) соответственно.

Сравним результаты вычислений средней очереди по формуле (9) с результатами имитационного эксперимента по прохождению квазипуассоновского потока через СМО G/D/1, см. рис. 2 и 3. Приведены примеры для разных значений параметров квазипуассоновского потока (результаты, полученные при имитационном моделировании изображены линиями, а оценки по формуле (9) – различными маркерами). Приближение получается весьма хорошее.

4. Аппроксимация очереди реального видеотрафика

Далее для опытов возьмем трассы трафика с видеокодека стандарта H264 при разных значениях размера видеобуфера, использующегося для сжатия видеокадров. Трасса в данном случае – это последовательность моментов выхода из видеокодека информационных пакетов, и каждый такой момент считается моментом прихода заявки на обслуживание в СМО G/D/1. Время обслуживания заявки берется таким, чтобы загрузка прибора ρ при этом входном потоке была равна заданной величине. Во время прохождения этого потока через СМО, вычисляется эмпирическое среднее по времени значение очереди для данного ρ .

Для каждой трассы реального трафика таким образом были найдены значения средней очереди для ряда значений загрузки прибора ρ , которые обозначены как $\hat{Q}(\rho_i)$, $i = 1, \dots, N$. Они использовались для оценки методом наименьших квадратов параметров квазипуассоновского потока, зависимость средней очереди которого в СМО G/D/1 от ρ аппроксимирует найденную в описанном выше имитационном эксперименте зависимость средней очереди реального трафика от ρ .

Оценки $\hat{\alpha}, \hat{B}$ параметров α, B аппроксимирующего квазипуассоновского потока были найдены как

$$\hat{\alpha}, \hat{B} = \arg \min_{\alpha, B} \sum_{i=1}^N \left(\hat{Q}(\rho_i) - \bar{Q}(\rho_i) \right)^2,$$

где $\bar{Q}(\rho_i)$ рассчитывалась по формуле (9).

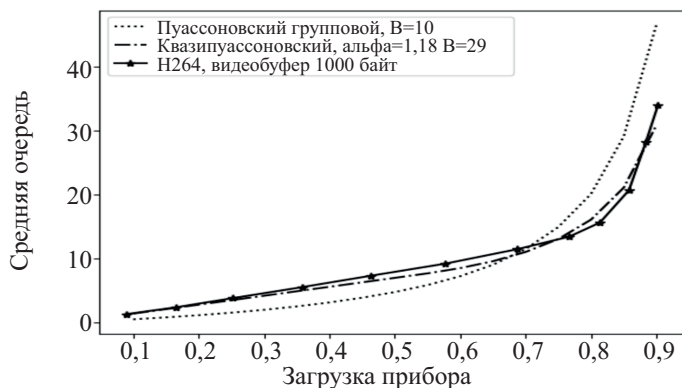


Рис. 4. Аппроксимация зависимости средней очереди от загрузки прибора для трафика видеокодека стандарта H264. Размер видеобуфера 1000 байт.

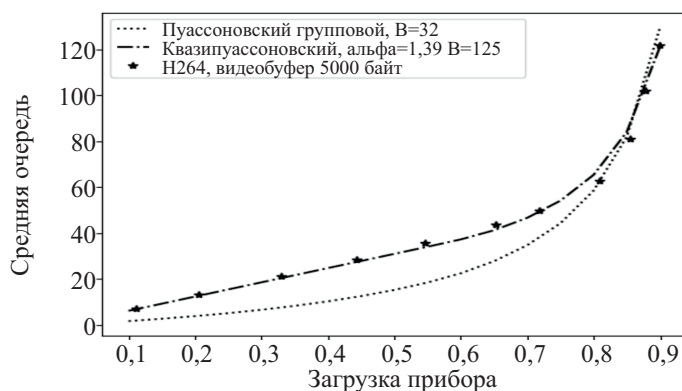


Рис. 5. Аппроксимация зависимости средней очереди от загрузки прибора для трафика видеокодека стандарта H264. Размер видеобуфера 5000 байт.

Результаты приведены на рис. 4 и 5, где для сравнения приведена также аналогичная аппроксимация групповым пуассоновским потоком, размер пачки которого находился также методом наименьших квадратов (для реального трафика график изображен сплошной линией, для аппроксимации квазипуассоновским потоком – пунктиром с маркерами, для аппроксимации пуассоновским потоком – точечным пунктиром). Очевидно, что квазипуассоновский поток обеспечивает значительно лучшую аппроксимацию средней очереди данного реального трафика.

Для полноты картины интересно посмотреть, насколько хорошо аппроксимируются дисперсии очередей реального трафика. Они приведены на рис. 6 и 7. Хотя различие между реальным трафиком и аппроксимирующим модельным трафиком больше, чем для средней очереди, приближение по-прежнему неплохое и гораздо лучше приближения, обеспечиваемого групповым пуассоновским потоком.

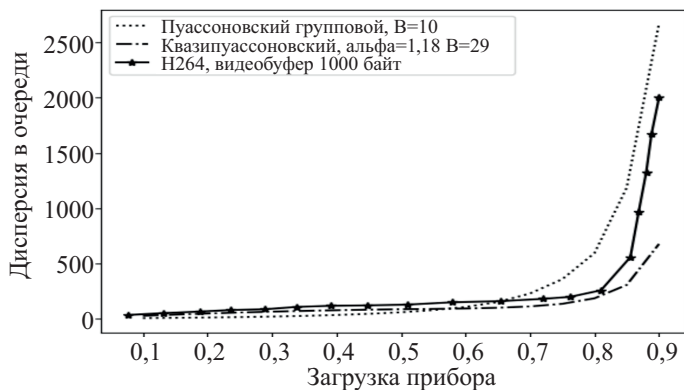


Рис. 6. Аппроксимация зависимости дисперсии очереди от загрузки прибора для трафика видеокodeка стандарта H264. Размер видеобуфера 1000 байт.

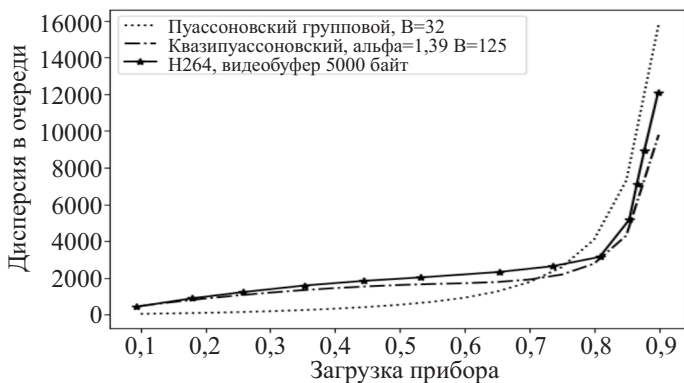


Рис. 7. Аппроксимация зависимости дисперсии очереди от загрузки прибора для трафика видеокodeка стандарта H264. Размер видеобуфера 5000 байт.

Заметим, что с практической точки зрения близость двух первых моментов распределения двух случайных величин позволяет говорить о большой близости и их распределений, так что представленные оценки имеют практическую ценность.

5. Оценка параметров аппроксимирующей модели с помощью нейросети

Выше удалось построить хорошую аппроксимирующую формулу для средней очереди. Представим здесь еще один способ оценки параметров модели трафика, пригодный для случая, когда аппроксимирующей формулы нет. Он заключается в обучении нейросети определять параметры квазипуассоновского потока.

Входными данными для нейросети является набор значений средней очереди для заданных загрузок прибора. В данной работе использовалось 9 значений, соответствующих загрузкам от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1. Выходных зна-

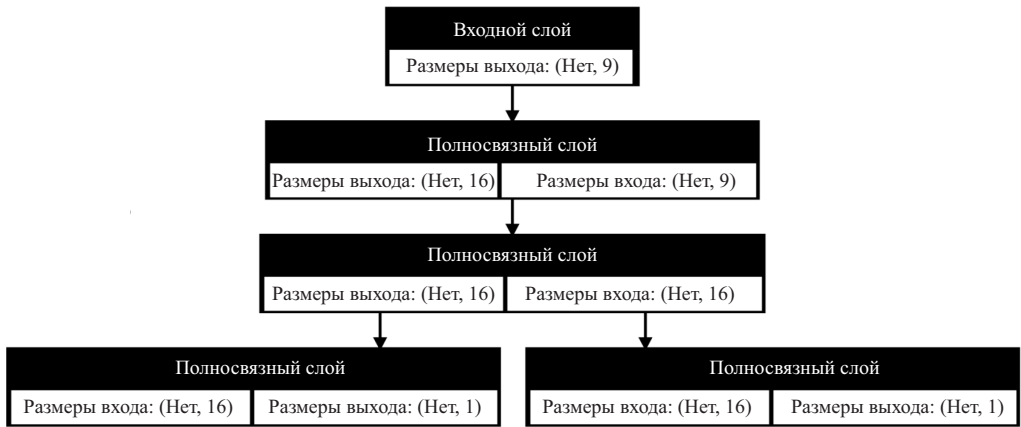


Рис. 8. Архитектура использованной нейросети (стандартное графическое изображение архитектуры, применяющееся в пакете Keras языка Python).

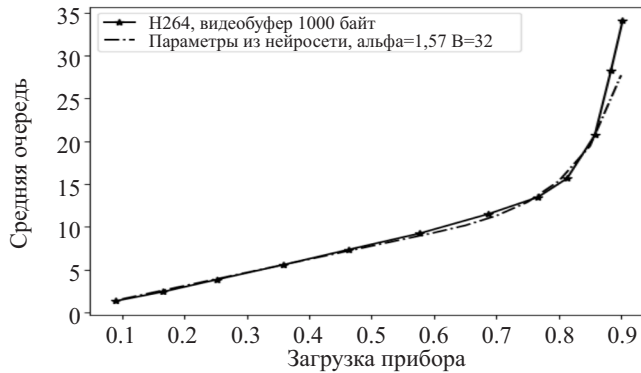


Рис. 9. Аппроксимация зависимости средней очереди от загрузки прибора для трафика видеокodeка H264 при определении параметров с помощью нейросети. Размер видеобуфера 1000 байт.

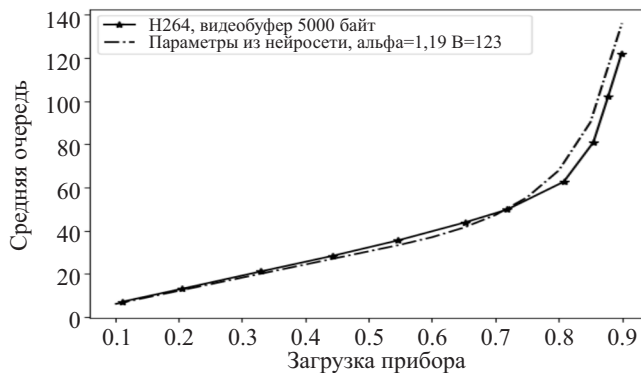


Рис. 10. Аппроксимация зависимости средней очереди от загрузки прибора для трафика видеокodeка H264 при определении параметров с помощью нейросети. Размер видеобуфера 5000 байт.

чений два – это значения параметров α и B . После окончания обучения с учителем нейросети в качестве входных параметров для распознавания подается набор средних значений очереди, полученных при прохождении через СМО реального трафика при тех же нагрузках. Выход нейросети является оценкой параметров квазипуассоновского потока для аппроксимации реального трафика.

На рис. 8 изображена архитектура использованной нейросети. У двух нейронов, каждый из которых является выходным слоем, оценивающим один из параметров квазипуассоновского потока, нелинейный элемент отсутствует, у всех остальных – “ReLU”. Все слои полносвязные.

Обучающая выборка состояла из 2000 примеров, но для каждой реальной трассы выборка была своя, обучающие примеры генерировались с параметрами из небольшого диапазона, в котором находилась искомая оценка (график средней очереди реального трафика лежал между графиками при граничных значениях параметров примеров из обучающей выборки).

На рис. 9 и 10 приведены результаты эксперимента – параметры, предсказанные нейросетью, использовались для имитационного моделирования, и на графиках приведена средняя очередь и для реального трафика, и для смоделированного (для реального трафика график изображен сплошной линией, для смоделированного – пунктирной с маркерами). Видно, что оценка тоже весьма неплоха.

6. Заключение

В работе был представлен квазипуассоновский поток с одинаковыми паузами как модель для аппроксимации средней очереди реального трафика на примере видеотрафика стандарта H264.

Аналитическая формула для оценки средней очереди, представленная в работе, обеспечивает хорошее приближение к результатам имитационного моделирования.

Параметры потока для аппроксимации средней очереди реального трафика, полученные с использованием этой формулы, обеспечивают аппроксимацию, значительно более точную, чем аппроксимация групповым пуассоновским потоком.

Была продемонстрирована возможность определения параметров потока для решения задачи аппроксимации с помощью нейронной сети, тоже дающая хорошие результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневский В.М., Дудин А.Н. Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационного трафика // *АиТ*. 2017. № 8. С. 3–59.
2. Neuts M.F. Markovian point process // *J. Appl. Probab.* 1979. V.16. Issue 4. P. 764–779. <https://doi.org/10.2307/3213143>

3. *Lakatos L., Szeidl L., Telek M.* Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications // Springer Science+Business Media, 2013. 388 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8>
4. *Klimenok V.I., Dudin A.N., Vishnevsky V.M., Semenova O.V.* Retrial BMAP/PH/N Queueing System with a Threshold-Dependent Inter-Retrial Time Distribution // Mathematics. 2022. V. 10(2). 269.
<https://doi.org/10.3390/math10020269>
5. *Vishnevsky V., Vytovtov K., Barabanova E., Semenova O.* Analysis of a MAP/M/1/N Queue with Periodic and Non-Periodic Piecewise Constant Input Rate // Mathematics. 2022. Vol. 10(10). 1684.
<https://doi.org/10.3390/math10101684>
6. *Лихтциндер Б.Я.* Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 290 с.
7. *Лихтциндер Б.Я., Бакай Ю.О.* Модели групповых пуассоновских потоков в управлении телекоммуникационным трафиком // Вест. Самар. гос. тех. ун-та. Серия: Технические науки. 2020. Т.28. № 3. С. 75–89.
8. *Lichtzinder B.Ya., Privalov A.Yu., Moiseev V.I.* Batch Poissonian Arrival Models of Multiservice Network Traffic // Problems of Information Transmission. 2023. V. 59. No. 1. P. 63–70.
9. *Lichtzinder B.Ya., Privalov A.Yu.* Generalization of Formulas for Queue Length Moments under Nonordinary Poissonian Arrivals for Batch Queues in Telecommunication Systems // Problems of Information Transmission. 2023. V. 59. No. 4. P. 243–248.
10. *Лихтциндер Б.Я., Привалов А.Ю.* Об использовании группового пуассоновского потока в имитационном моделировании современного видеотрафика // Информационные технологии. 2023. Т. 21. № 3(83). С. 11–16.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.М. Вишневым.

Поступила в редакцию 03.09.2024

После доработки 03.06.2025

Принята к публикации 20.06.2025