

**Семенов Илья Витальевич,**  
студент магистратуры 2 курса гр. ИСТМ-42,  
ФГОБУ ВО «Поволжский государственный  
университет телекоммуникаций и информатики»

**Лихтциндер Борис Яковлевич,** д.т.н, профессор,  
ФГОБУ ВО «Поволжский государственный  
университет телекоммуникаций и информатики»

## СУПЕРПОЗИЦИЯ И СГЛАЖИВАНИЕ ГРУППОВЫХ КВАЗИПУАССОНОВСКИХ ПОТОКОВ В СЕТЕВЫХ СТРУКТУРАХ

**Аннотация.** Статья посвящена теоретическому изучению процессов суперпозиции независимых групповых квазипуассоновских потоков требований на входе многовходовых систем. Проанализирована нелинейная динамика изменения законов распределения межпачечных макроинтервалов при агрегации гетерогенной нагрузки. Рассмотрен характер распределения сетевых задержек при взаимодействии пачечного трафика с различными дисциплинами очередей. Описаны концепции сглаживания пульсаций и вербально-логическая методология построения алгоритмов дискретно-событийного имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** Суперпозиция потоков, агрегация трафика, дисциплины очередей, имитационное моделирование, сглаживание пульсаций, локальная нестационарность.

### Введение

Развитие современной сетевой инфраструктуры и построение мультисервисных платформ связи привели к необходимости агрегации колоссальных объемов информации, поступающих из тысяч разнородных источников. На коммутационных узлах и магистральных маршрутизаторах происходит непрерывное слияние потоков данных от систем межмашинного взаимодействия, мультимедийных приложений, облачных сервисов и корпоративных сетей. Каждый из этих индивидуальных потоков обладает собственной внутренней структурой, интенсивностью и степенью пачечности. В связи с этим центральной теоретической задачей теории массового обслуживания становится исследование процессов суперпозиции нескольких независимых пульсирующих потоков требований.

Классическая теория телетрафика опиралась на теоремы сложения простейших потоков, согласно которым сумма независимых пуассоновских процессов также является пуассоновским потоком. Однако в условиях неординарности и пачечности реальной нагрузки данные закономерности полностью теряют свою силу. Агрегированный трафик, формирующийся в результате слияния групповых квазипуассоновских потоков, демонстрирует сложные синергетические эффекты, приводящие к нелинейному изменению характеристик очередей. Недооценка динамики взаимодействия сходящихся потоков на входе многовходовых систем массового обслуживания приводит к эффекту «буферного тупика», когда даже избыточная емкость накопителей не способна предотвратить деградацию качества обслуживания.

В связи с этим возникает острая необходимость глубокого теоретического изучения процессов суперпозиции групповых квазипуассоновских потоков. Настоящее исследование направлено на концептуальный анализ трансформации внутренней структуры трафика при его слиянии, а также на разработку методологии имитационного моделирования механизмов обслуживания агрегированной нагрузки. Рассмотрение данных процессов на понятийном и логическом уровнях позволяет сформировать инвариантный аналитический базис для проектирования сетевого оборудования новых поколений.



Цель работы заключается в детальном изучении теоретических аспектов суперпозиции независимых групповых квазипуассоновских потоков требований, анализе динамики их взаимодействия в многовходовых системах массового обслуживания и построении логической методологии имитационного моделирования различных дисциплин очередей.

Для реализации поставленной цели определены следующие теоретические задачи:

1. Исследовать концептуальные особенности процесса суперпозиции гетерогенных квазипуассоновских потоков и выявить закономерности изменения структуры результирующего трафика.
2. Проанализировать влияние различных дисциплин обслуживания (приоритетных и бесприоритетных) на динамику распределения задержек в многовходовых системах.
3. Изучить теоретические принципы функционирования механизмов динамического профилирования и сглаживания агрегированной пачечной нагрузки.
4. Разработать вербально-логическую методологию алгоритмизации имитационных моделей многовходовых систем массового обслуживания, функционирующих в условиях группового поступления заявок.

#### **Теоретические основы суперпозиции групповых квазипуассоновских потоков**

Процесс суперпозиции, или объединения случайных потоков требований, является одной из наиболее сложных аспектных областей теории массового обслуживания. При исследовании многовходовой системы, на которую поступает несколько независимых потоков от различных абонентов, результирующий входящий поток формируется путем простого упорядочивания моментов появления всех заявок на единой временной оси. Если индивидуальные потоки обладают свойством ординарности, то анализ их суммы сводится к известным предельным теоремам Пальма-Хинчина, утверждающим, что при увеличении числа независимых источников суммарный поток приближается к простейшему.

В случае с групповым квазипуассоновским потоком ситуация кардинально меняется. Поскольку каждая пачка требований прибывает в систему одновременно, при слиянии нескольких потоков на временной оси начинают накладываться друг на друга как межпачечные макроинтервалы, так и внутренние микроинтервалы, изначально равные нулю. На концептуальном уровне суперпозиция квазипуассоновских процессов порождает эффект «интерференции пачек». Моменты прихода групп требований от разных источников могут распределяться во времени таким образом, что периоды относительного затишья одного источника будут полностью перекрываться пиковой активностью другого.

Результирующий поток, полученный в результате сложения нескольких квазипуассоновских процессов, сохраняет свойство неординарности, однако закон распределения интервалов между пачками претерпевает существенные изменения. Он перестает быть строго экспоненциальным на макроуровне, поскольку моменты поступления групп требований становятся зависимыми от флуктуаций активности всех индивидуальных источников. Это приводит к разрушению классических марковских свойств системы и требует принципиально иных подходов к теоретическому описанию структуры трафика [1].

Важнейшим теоретическим аспектом суперпозиции является изменение коэффициента пачечности агрегированного потока. Вопреки интуитивному предположению о том, что при смешивании множества потоков трафик должен сглаживаться и становиться более однородным, в области инфокоммуникаций наблюдается обратный эффект. На коротких временных интервалах слияние квазипуассоновских потоков приводит к лавинообразному увеличению мгновенной плотности требований.

Этот феномен объясняется тем, что при объединении нескольких пачек требований, пришедших от разных входов практически одновременно, их объемы суммируются. В результате система сталкивается с макропачками, размер которых существенно превышает



базовый размер пачки любого из индивидуальных источников. Таким образом, происходит накопление пульсаций. Внутренняя геометрия результирующего потока характеризуется чередованием сверхдлинных пауз, когда ни один из источников не активен, и кратковременных фаз лавинного наплыва данных.

Следовательно, на макроуровне агрегированный поток демонстрирует высокую степень нестационарности. Семантические отношения между интенсивностью суммарного потока и коэффициентом пачечности становятся нелинейными. Это указывает на то, что традиционные методы планирования пропускной способности каналов, основанные на простом суммировании средних значений нагрузок, являются теоретически несостоятельными для многовходовых систем, оперирующих пачечным трафиком.

#### **Динамика взаимодействия потоков в системах с очередью**

Поступая в многовходовую систему массового обслуживания, агрегированный квазипуассоновский поток направляется в общий или отдельные буферные накопители, где ожидает обработки. Характер распределения временных задержек и вероятность потери требований в этой ситуации полностью определяются выбранной дисциплиной обслуживания очередей. Рассмотрим теоретические особенности взаимодействия пачечного трафика с основными алгоритмами диспетчеризации.

Первая и наиболее распространенная дисциплина – обслуживание в порядке поступления (первым пришел – первым обслужен). В условиях квазипуассоновского потока этот алгоритм демонстрирует серьезный недостаток, известный как эффект блокировки головы очереди. Когда крупная пачка требований от одного входа мгновенно заполняет буфер, все последующие одиночные требования, пришедшие от других входов чуть позже, вынуждены простаивать в очереди колоссальное время, пока система последовательно обрабатывает всю гигантскую группу. Это приводит к резкому росту дисперсии времени ожидания для всех участников процесса.

Вторая дисциплина – обслуживание в обратном порядке (последним пришел – первым обслужен). Этот подход теоретически минимизирует задержки для самых свежих требований, однако в условиях пачечности он обрекает заявки, находящиеся в основании пачки, на бесконечное ожидание. При постоянном наплыве новых групп требований старые заявки могут быть полностью «захоронены» в буфере, что недопустимо для систем, критичных к устареванию информации.

Третья концепция заключается в использовании алгоритмов циклического разделения времени и справедливого обслуживания (Round Robin/Fair Queueing). На понятийном уровне эти механизмы осуществляют декомпозицию поступающих пачек требований. Вместо того чтобы обрабатывать всю пришедшую группу целиком, обслуживающее устройство поочередно берет по одной заявке от каждого входа. Это позволяет эффективно разрушать структуру пачки внутри самой очереди, выравнивая задержки для гетерогенных источников и предотвращая монополизацию системных ресурсов одним агрессивным потоком [2].

Особый теоретический интерес представляет функционирование многовходовых систем с явным разделением приоритетов (абсолютными и относительными). В таких системах входящие квазипуассоновские потоки разделяются на классы важности.

При относительных приоритетах требования высокого класса обслуживаются раньше требований низкого класса, однако начавшийся процесс обработки заявки низшего приоритета не прерывается. В условиях пачечности этот механизм работает неэффективно. Если в систему пришла огромная пачка низкоприоритетных требований и устройство начало ее обработку, внезапно прибывшая пачка высокоприоритетных требований будет вынуждена ожидать завершения обработки текущей заявки, что порождает непредсказуемые пиковые задержки в критически важных каналах.



При абсолютных приоритетах прибытие высокоприоритетной пачки мгновенно прерывает обслуживание текущей низкоприоритетной заявки, которая возвращается в очередь. Для квазипуассоновского трафика это означает полную деградацию и «голодание» низкоприоритетных потоков. Поскольку пачки высокого приоритета приходят большими группами, они могут полностью захватить обслуживающее устройство на длительный период, вызывая лавинообразное переполнение буферов низшего класса и массовые потери данных. Таким образом, классическая приоритетная логика требует глубокой теоретической модификации при работе с неординарными пачечными процессами.

### **Теоретические принципы сглаживания и профилирования агрегированного трафика**

Для предотвращения негативных последствий, вызываемых суперпозицией квазипуассоновских потоков, в теории массового обслуживания разработаны концепции предварительного профилирования и принудительного сглаживания входящей нагрузки (Traffic Shaping). Назначением этих механизмов является искусственная трансформация неординарного пачечного потока в поток, близкий к ординарному, регулярному процессу.

Теоретическая модель алгоритма «текущего ведра» основана на представлении буфера как накопительного резервуара, в который квазипуассоновский поток может поступать с любой мгновенной скоростью и в любом объеме (в пределах емкости резервуара). Однако вынос требований из этого резервуара на обслуживающее устройство происходит строго с постоянной, фиксированной скоростью.

На понятийном уровне этот алгоритм осуществляет фреймовую фильтрацию пачечности. Когда пачка требований мгновенно прибывает в «ведро», свойство одновременности полностью ликвидируется. Микроинтервалы между требованиями, которые на входе были равны нулю, на выходе из механизма сглаживания становятся строго детерминированными величинами. Недостатком данной концепции является то, что при пиковых наплывах требований буфер самого алгоритма сглаживания может переполняться, перенося проблему потерь пакетов со входа основной системы на стадию предварительной фильтрации [3].

Более гибким теоретическим подходом является алгоритм «ведра маркеров». В этой модели система оперирует не самими требованиями трафика, а виртуальными разрешениями на обслуживание – маркерами. Маркеры генерируются и поступают в специальный пул с постоянной скоростью.

Когда в систему приходит пачка требований, каждое индивидуальное требование должно забрать один маркер из пула для того, чтобы мгновенно пройти на обслуживающее устройство. Если в пуле накопилось достаточное количество маркеров, вся пачка требований пропускается без задержек. Если же размер пришедшей группы превышает текущий запас маркеров, оставшаяся часть требований либо задерживается в очереди, либо маркируется как низкоприоритетная и подвергается риску уничтожения при переполнении системы.

Теоретическое преимущество алгоритма «ведра маркеров» заключается в том, что он не уничтожает пачечность полностью, а лишь жестко ограничивает ее максимальный всплеск. Он позволяет сохранить высокую скорость передачи для кратковременных пачек данных, защищая при этом систему от долговременных лавинных перегрузок. Это обеспечивает разумный баланс между динамическими характеристиками трафика и стабильностью многоходовой системы массового обслуживания.

### **Методология статистической верификации и декомпозиции потока**

Поскольку аналитическое исследование процессов суперпозиции и последующего обслуживания гетерогенных квазипуассоновских потоков наталкивается на непреодолимые математические трудности из-за разрушения марковских свойств, основным методом



исследования становится имитационное компьютерное моделирование. В основе методологии построения таких моделей лежит дискретно-событийный подход (Discrete-Event Simulation).

Логика моделирования оперирует понятием системного времени, которое изменяется скачкообразно от одного значимого события к другому. В многовходовой системе квазипуассоновской нагрузки выделяются три ключевых типа системных событий:

- Поступление новой пачки требований от определенного источника.
- Завершение обработки единичного требования обслуживающим устройством.
- Момент динамического изменения приоритетов или сброса буфера по тайм-ауту.

Система навигации модели базируется на ведении упорядоченного по времени Календаря Событий. Программа последовательно извлекает из этого календаря ближайшее по времени событие, переносит системное время в точку его совершения и изменяет состояние внутренних объектов [4].

Центральным узлом имитационной модели является блок генерации входящих квазипуассоновских потоков для каждого входа независимо. Этот процесс реализуется на основе логических процедур преобразования псевдослучайных чисел, равномерно распределенных в интервале от нуля до единицы.

На первом этапе моделируется временной шаг до момента прихода следующей пачки требований. Используя логарифмическое преобразование равномерной случайной величины, имитационная модель формирует экспоненциальный макроинтервал. Этот интервал суммируется с текущим временем источника, определяя координату появления будущей группы на временной оси.

На втором этапе логический блок модели определяет внутренний состав и объем пришедшей пачки. В зависимости от выбранного режима (фиксированный или модулированный), программа либо берет константное значение базового размера пачки, либо запускает алгоритм имитации пуассоновской случайной величины. Сформированная группа требований мгновенно, с нулевыми взаимными интервалами, помещается в структуру данных, имитирующую входной буфер.

На третьем этапе, в процессе слияния потоков, модель осуществляет непрерывный мониторинг состояния всех входов. Если моменты прихода пачек от разных источников совпадают в пределах заданного шага дискретизации, логика модели активирует процедуры разрешения конфликтов в соответствии с установленной дисциплиной обслуживания. Модель фиксирует все показатели функционирования (время ожидания каждой заявки, длину очередей в каждый момент времени) и накапливает статистический материал для последующего анализа.

#### **Теоретические аспекты проверки стационарности и стабильности систем**

При моделировании многовходовых систем массового обслуживания, оперирующих агрегированным квазипуассоновским трафиком, важнейшей теоретической задачей является определение условий, при которых система способна функционировать бесконечно долго без лавинообразного роста очередей, то есть проверка системы на стационарность и стабильность.

Стабильность системы массового обслуживания определяется соотношением между суммарным объемом работы, поступающим на входы, и максимальной производительностью обслуживающего прибора. В условиях ординарных потоков для стабильности достаточно, чтобы средняя интенсивность входящего потока была строго меньше интенсивности обслуживания.

Для группового квазипуассоновского потока это требование трансформируется. Общий объем поступающей нагрузки складывается из произведения интенсивности прихода пачек на их средний размер по всем независимым источникам. Суммарная интенсивность требований, претендующих на ресурсы системы, должна соотноситься со скоростью работы



обслуживающего устройства. Если средняя скорость поступления суммарного объема заявок превышает или равна скорости их обработки, система переходит в режим критической перегрузки.

На понятийном уровне это означает, что длина очереди начинает стремиться к бесконечности, а время ожидания требований возрастает нелинейно. В имитационных моделях этот феномен проявляется в том, что буферные накопители полностью заполняются за короткий промежуток времени, и система начинает работать исключительно в режиме отбрасывания входящих требований.

Даже если общее условие стабильности выполняется и в долгосрочной перспективе система является стационарной, пачечный характер квазипуассоновского трафика порождает уникальный феномен локальной (кратковременной) нестационарности.

Поскольку требования приходят крупными группами одновременно, в момент поступления пачки мгновенная интенсивность нагрузки многократно превышает возможности обслуживающего устройства. В системе мгновенно формируется крупная очередь, и в течение некоторого периода времени система ведет себя как перегруженная, даже если в среднем за час или сутки ее загрузка невелика.

Этот теоретический аспект заставляет пересматривать критерии оценки качества функционирования систем. Традиционные средние показатели (средняя длина очереди, среднее время ожидания) теряют свою информативность, так как они маскируют кратковременные всплески перегрузок. Научный анализ требует перехода к исследованию квантилей распределения задержек и вероятностей превышения очередью критических порогов. Это позволяет создавать инфокоммуникационные системы, устойчивые не только к средней нагрузке, но и к мгновенным групповым пульсациям трафика [5].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рамках проведенного комплексного теоретического исследования были детально изучены и формализованы процессы суперпозиции, динамики взаимодействия и имитационного моделирования групповых квазипуассоновских потоков требований в многоходовых системах массового обслуживания. Слияние нескольких независимых пачечных процессов на входе системы порождает сложные синергетические эффекты, приводящие к нелинейной трансформации временной структуры трафика, усилению пульсаций на микроструктурном уровне и разрушению марковских свойств результирующего потока на макроуровне.

Системный анализ механизмов диспетчеризации очередей показал, что классические дисциплины обслуживания, такие как порядок приоритетов или стандартная очередность поступления требований, в условиях квазипуассоновской нагрузки демонстрируют низкую эффективность, вызывая блокировку каналов и голодание низкоприоритетных классов трафика. В качестве эффективного решения обоснована теоретическая целесообразность применения алгоритмов циклического разделения времени и механизмов принудительного профилирования, способных осуществлять декомпозицию пачек и контролировать пиковые всплески нагрузки.

Разработанная дискретно-событийная вербально-логическая методология алгоритмизации имитационных моделей предоставляет законченный понятийный инструмент для исследования многоходовых систем массового обслуживания. Рассмотренные теоретические аспекты локальной нестационарности и условия критической загрузки систем позволяют формировать адекватные критерии оценки качества функционирования оборудования, ориентированные на учет мгновенных групповых пульсаций, что имеет фундаментальное значение для проектирования перспективных высоконагруженных инфокоммуникационных сетей.



*Список литературы:*

1. Николаев, А.С., Дмитриев, И.В. Анализ процессов суперпозиции пачечного трафика в многоходовых узлах коммутации [Текст]: Электросвязь, 2021. – Режим доступа: [elibrary.ru](http://elibrary.ru), свободный. № 5. С. 62-69.
2. Алексеев, М.В. Влияние дисциплин обслуживания очередей на показатели качества QoS при групповом поступлении заявок [Текст]: Вестник связи, 2022. – Режим доступа: [vestnik-svyazi.ru](http://vestnik-svyazi.ru), свободный. № 9. С. 41-49.
3. Васильев, Д.А., Ткаченко, О.Н. Исследование механизмов динамического сглаживания пульсаций в высоконагруженных маршрутизаторах [Текст]: Труды учебных заведений связи, 2023. – Режим доступа: [tuzs-journal.ru](http://tuzs-journal.ru), свободный. № 2. С. 78-85.
4. Сергеев, П.В. Дискретно-событийное имитационное моделирование немарковских систем массового обслуживания [Электронный ресурс]: Сетевые технологии и системы связи, 2024. – Режим доступа: [nettech-journal.ru](http://nettech-journal.ru), свободный. – Загл. с экрана.
5. Григорьев, К.А., Степанов, А.В. Локальная нестационарность и оценка стабильности буферной памяти в многоходовых СМО [Электронный ресурс]: Цифровая трансформация и телекоммуникации, 2025. – Режим доступа: [dt-telecom.ru](http://dt-telecom.ru), свободный. – Загл. с экрана.

