

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМЕНИ ПАТРИСА ЛУМУМБЫ"**

*На правах рукописи*

Алию Башир

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКАМИ  
В БЕСПРОВОДНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

Специальность 1.2.3 Теоретическая информатика, кибернетика

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата

Физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук  
Самуйлов Константин Евгеньевич

Москва – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. Особенности построения моделей беспроводных сенсорных сетей	10
1.1. Обзор сценариев перегрузки в беспроводных сенсорных сетях	10
1.2. Сравнение улучшенной модели произвольного раннего обнаружения и модели порогового управления	27
1.3. Постановка задачи по исследованию контроля перегрузки шлюза беспроводной сенсорной сети.	37
ГЛАВА 2. Марковская модель с пороговым управлением очередью	38
2.1. Модель массового обслуживания с двухуровневым пороговым управлением очередью	38
2.2. Система уравнений равновесия и стационарное распределение	45
2.3. Численный анализ вероятностно-временных характеристик	52
ГЛАВА 3. Закон распределения и характеристики времени пребывания Марковского процесса в состояниях перегрузки	61
3.1. Марковская модель многопорогового управления	61
3.2. Метод анализа вероятностно-временных характеристик	68
3.3. Анализ модели управления с несколькими порогами	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	78
СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	80
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	82

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Облачные беспроводные сенсорные сетевые системы – это продукты современных информационных и телекоммуникационных технологий. Беспроводные сенсорные сети (англ., Wireless Sensor Network, WSN) и облачные вычисления — это новые технологии, соответственно, в области сетевых и вычислительных технологий. Сети WSN интегрируют датчики и облачные вычисления в расширенную форму облачной инфраструктуры, которая управляет датчиками, расположенными по всей сети. Сеть играет решающую роль в задачах облачных вычислений и приобретает еще большую значимость в распределенных сенсорных сетях из-за ограниченных ресурсов. Таким образом, передача данных с датчиков на облачные серверы должна контролироваться, чтобы избежать перегрузки сети. В исследовании рассматривается контроль перегрузки в облаке датчиков на основе метода порогового управления нагрузкой. В ряде работ этот метод называют методом «гистерезисного управления» из-за того, что в диаграмме состояний соответствующего марковского процесса (МП) имеется петля, связывающая два уровня состояний этого случайного процесса (см., например, рис. 2.3 в Главе 2 данной диссертационной работы). Этот термин для краткости и по аналогии с работами [33,45,67] будет использоваться наряду с термином «пороговое управление». В диссертационной работе используется гистерезисный подход применяется для решения проблемы перегрузки трафика в облачных беспроводных сенсорных сетях. Предложены механизмы для двухпорогового и многопорогового управления нагрузкой, а также разработаны модели массового обслуживания для анализа и оценки производительности предлагаемых схем управления перегрузкой. Анализ показывает, что гистерезисное управление нагрузкой обеспечивает достаточную полосу пропускания для передачи данных. Простота реализации механизма управления и низкая сложность предлагаемого алгоритма делают его приемлемым для беспроводных сенсорных сетей. В исследовании предложена математическая модель в виде системы массового обслуживания (СМО) с гистерезисным управлением нагрузкой для аналитического моделирования

контроля перегрузки в беспроводных сенсорных сетях. Модель позволяет проводить анализ показателей качества обслуживания (англ. Quality of Service, QoS), такие как средняя длина очереди, вероятность блокировки и среднее время ожидания для начала обслуживания.

Поскольку системы облачных беспроводных сенсорных сетей стали повсеместными, отсюда вытекающий экспоненциальный рост объема трафика, генерируемого физическими датчиками, которые геопространственно распределены в окружающей среде. Следовательно, на этом фоне стало актуальным разработать новые эффективные и надежные модели, такие как предлагаемая модель гистерезисного порогового управления, для эффективного внедрения улучшенной системы управления очередями и для замены традиционных моделей, таких как RED и улучшенный алгоритм случайного раннего обнаружения (англ. Improved Random Early Detection, IRED). Для моделей раннего обнаружения перегрузок RED и IRED известны некоторые «узкие» места, не позволяющие эффективно управлять нагрузкой, особенно на шлюзах WSN.

**Степень разработанности темы.** Для эффективного вычисления и анализа основных упомянутых выше ключевых показателей эффективности, используются математические модели в виде систем массового обслуживания и сетей. При построении и анализе таких моделей используются методы теории вероятностей, случайных процессов [1]–[5], теории массового обслуживания [6]–[7], теории сетей массового обслуживания [8]–[11], теории телеграфика [12] и статистического моделирования сложных систем [13]–[15]. К российским ученым, исследователям, внесшим большой вклад в эти области, относятся Г.П. Башарин [79 - 83], П.П. Бочаров [80, 84], В.М. Вишневецкий [85 - 88], Ю.В. Гайдамака [110, 111, 132, 133], А.Н. Дудин [86], А.И. Зейфман [115-119], Гольдштейн Б.С [89], А.Е. Кучерявый [89, 90], Е.А. Кучерявый [90, 95], А.Н. Моисеев [92, 93], С.П. Моисеева [91], Д.А. Молчанов [94, 95], А.А. Назаров [96], В.А. Наумов [97 - 100, 110, 111, 133], А.П. Пшеничников [101], В.В. Рыков [78], К.Е. Самуйлов [82, 98 - 100, 110, 111, 121, 132, 133], С.Н. Степанов [106 - 108], М.С. Степанов [108], И.И. Цитович [122, 123], С.Я. Шоргин [113, 114, 120, 121] и др., а к зарубежным – М. Dohler [130], J.G. Andrews

[126-129], F.P. Kelly [103, 104], V.B. Iversen [109], L. Kleinrock [77], E. Gelenbe [124, 125], K.W. Ross [105] и др.

Обзор конкретных работ содержится в главах диссертационной работы по мере изложения решений поставленных задач.

**Целью диссертационной работы** является разработка и анализ моделей для расчета показателей эффективности в задаче управления перегрузками в беспроводных распределенных сенсорных сетях.

Для достижения цели в диссертационной работе решаются следующие задачи.

1. Построение в виде системы массового обслуживания модели порогового управления перегрузками на шлюзе беспроводной распределенной сенсорной сети.
2. Сравнение модели порогового управления с моделью произвольного раннего обнаружения при различных значениях нагрузок по основным показателям эффективности – значениям вероятности сброса пакета и среднему времени пребывания в системе.
3. Построение и анализ модели многопорогового управления трафиком в сети и разработка метода расчета характеристик системы в переходном режиме – функции распределения, среднего значения и дисперсии времени пребывания системы в подпространствах множества состояний.

### **Научная новизна**

1. В отличие от моделей, применяющих алгоритм произвольного раннего обнаружения, предложенный метод порогового управления перегрузкой в беспроводных распределенных сенсорных сетях позволяет улучшить временные характеристики системы за счет введения порогов в множестве состояний МП, позволяющих снижать нагрузку на систему.
2. Для многопороговой модели решена задача расчета функции распределения времени пребывания в множестве перегрузки и повышенной нагрузки. В отличие от известных, модель многопорогового управления учитывает

приоритетность различных типов трафика, поступающего от сенсоров на шлюз.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы проектными и научно-исследовательскими организациями, операторами сетей связи при планировании сетей радиодоступа для предоставления услуг с требуемым качеством. Разработанные математические модели позволяют провести анализ показателей эффективности в беспроводных распределенных сенсорных сетях с пороговым управлением перегрузками. Результаты работы включены в исследования по гранту РФФИ № 21-79-00157 «Построение и анализ моделей взаимодействия пользователей с базовыми станциями сети 5/6G средствами беспилотных летательных аппаратов».

**Реализация результатов работы.** Основные научные достижения, полученные в диссертации, использованы в исследованиях по гранту РФФИ «Построение и анализ моделей взаимодействия пользователей с базовыми станциями сети 5/6G средствами беспилотных летательных аппаратов».

**Методология и методы исследования.** В диссертации применяются методы теории массового обслуживания, теории вероятностей, теории случайных процессов и математической теории телетрафика.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Предложенная модель порогового управления перегрузками на шлюзе беспроводной распределенной сенсорной сети позволяет улучшить систему управления за счет возможности регулирования времени нахождения МП, описывающего функционирование системы, в состоянии снижения нагрузки.
2. Модель СМО с пороговым управлением в области высоких значений нагрузочных параметров дает лучшие показатели функционирования по сравнению с алгоритмом улучшенного произвольного раннего обнаружения, в том числе по значениям вероятности сброса пакета и среднему времени пребывания заявки в системе.

3. Предложенный метод анализа многопоточковой СМО с многопороговым управлением нагрузкой, в отличие от известных, позволяет рассчитать характеристики МП в переходном режиме, в том числе, функцию распределения времени пребывания в множестве состояний перегрузки и превышенной нагрузки.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на научных конференциях и семинарах: международная конференция «International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)» (Брно, Чехия, 2021 г.); международная конференция по проводным и беспроводным сетям и системам следующего поколения (NEW2AN) (Ташкент, Узбекистан, 2022 г.); всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем (ИТТММ)» (Москва, 2021 г., 2022 г., 2023 г.)

Основные результаты опубликованы в ведущих научных сборниках и журналах – Lecture Notes in Computer Science, International Journal of Energy Economics and Policy, Информатика и ее применение, а также в трудах международных конференций, индексируемых WoS (Web of Science) и Scopus.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационное исследование соответствует следующим разделам паспорта специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика, а именно п. 11 «Распределенные многопользовательские системы»; п. 12 «Модели информационных процессов и структур»; п. 23 «Новые интернет - технологии, включая средства поиска, анализа и фильтрации информации».

**Объем и структура работы.** Структура диссертации состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 76 источников. Научная работа изложена на 91 страницах текста, содержит 39 рисунков и 3 таблицы.

**Краткое изложение диссертации.** Диссертация состоит из трех глав.

*Глава 1* посвящена особенностям построения моделей систем облачных беспроводных сенсорных сетей [16]–[18]. В разделе 1.1 представлен обзор

сценариев перегрузки в системах облачных беспроводных сенсорных сетей. Также в нем описаны известные подходы по уменьшения перегрузки на шлюзах облачных WSN. В разделе 1.2 представлена улучшенная модель произвольного раннего обнаружения (IRED) по управлению перегрузкой шлюза сенсорной сети. В разделе 1.3 представлена постановка задачи по исследованию контроля перегрузки шлюза WSN. При написании раздела 1.3 использовались публикации [55, 64-65] с участием автора.

*Глава 2* посвящена анализу марковской модели порогового управления очередью, и ее сравнению с моделью IRED. В разделе 2.1 Представлена модель массового обслуживания с двухуровневым пороговым управлением. В разделе 2.2 получена система уравнений равновесия (СУР) и стационарное распределение вероятностей состояний системы. Раздел 2.3 посвящен численному анализу вероятностно-временных характеристик. При написании разделов 2.1 – 2.3 использовались публикации [33, 63] с участием автора.

*Глава 3* посвящена анализу законы распределения и вероятностно-временных характеристик (ВВХ) времени пребывания МП, описывающего функционирование модели, в множестве состояний перегрузки. В разделе 3.1 предложен метод нахождения закона распределения с.в. (случайной величины) времени пребывания в множестве состояний перегрузки. В разделе 3.2 представлен метод расчета ВВХ, а в разделе 3.3 – анализ модели управления с несколькими пороговыми значениями. При написании главы 3 использовалась публикация [66] с участием автора.

В заключительном разделе представлены основные результаты диссертационной работы.

**Личный вклад.** Программные средства, используемые для численного анализа, и представленные в диссертации модели и результаты их анализа получены лично автором.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 7 печатных изданиях [64, 65, 55, 33, 63, 66, 67], из которых издание [63] из списка ВАК/РУДН, а издания [55, 33, 66] входят в базы данных Scopus/WoS.



## ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

### 1.1 Обзор сценариев перегрузки в беспроводных сенсорных сетях

Беспроводная сенсорная сеть представляет собой совокупность разнообразных беспроводных узлов, которые являются сенсорными по своей природе. Развертывание этих узлов осуществляется на обширном географическом пространстве с помощью вычислительного центра обработки, называемого шлюзом [17]. Беспроводное обнаружение (зондирование) и сеть передачи данных являются двумя основными применениями WSN, согласно [17]. Широкое применение WSN сегодня затронуло все области человеческих профессий. Несмотря на свои преимущества, WSN также имеет ряд проблем, такие как нехватка ресурсов, энергозатраты, ограничение памяти и вычислительных мощностей. Особо следует отметить проблему перегрузки сети на сетевом шлюзе облачных беспроводных датчиков, на решение которой и направлена данная диссертационная работа. Считается, что система WSN переходит в состояние перегрузки, как только встроенный трафик превышает пропускную способность сети. Некоторыми из сопутствующих эффектов перегрузки являются ухудшение качества обслуживания сети, задержка в очереди, потеря пакетов и блокирование вновь поступающего пакета.

С другой стороны, облако датчиков – это гибрид сенсорной сети и платформы облачных вычислений, предоставляющий пул общих вычислительных ресурсов для конечных пользователей [19]. Облачная инфраструктура датчиков объединяет беспроводную сенсорную сеть и облачные вычисления, чтобы предоставлять услуги по запросу для обработки и хранения данных от датчиков в режиме реального времени. Как и у любой другой системы, у этой интеграции много достоинств, но у нее также есть некоторые узкие места и недостатки. Передача данных была выделена как одна из важных проблем в облаке датчиков [19]. Сенсорное облако определяется в [18] как облачная платформа для Интернета вещей (англ. Internet of things, IoT), которая обеспечивает виртуализацию, множественную аренду и динамические сервисы. Архитектура устроена таким

образом, что виртуальные датчики построены поверх физических датчиков, так что они могут динамически использоваться пользователями в соответствии с их требованиями [18].

Далее кратко представлены основные подходы, используемые в различных источниках, посвященных области контроля перегрузки облачных беспроводных сенсорных сетей согласно проведенному обзору литературы.

WSN состоят из множества приложений, использующих различные типы сенсоров, задающих различные требования с точки зрения QoS и надежности. Согласно [17] стратегии распределения трафика, основанные на конкретных приложениях, могут быть сгруппированы в четыре категории, а именно: приложения непрерывного зондирования; приложения, управляемые запросами; приложения, управляемые событиями, и гибридные приложения.

Приложения непрерывного зондирования (управляемые временем) – эта стратегия распределения трафика связана с мониторингом множества реальных приложений, требующих непрерывного наблюдения, таких как мобильные приложения для социальных сетей и приложения для мониторинга атомных станций. При обнаружении значительного увеличения нагрузки на сеть, вместо непрерывного зондирования, может быть принято периодическое зондирование с учетом конкретных требований сети к периодичности.

Приложения, управляемые событиями – как следует из названия, эти приложения распознают сеть только при возникновении события в сети. Типичным сценарием в реальной жизни здесь является приложение для мониторинга активности на поле боя, где отдельные узлы обнаруживают своих соседей, расположенных через фиксированные промежутки времени. Загрузка измеренных данных со всех узлов на базовую станцию запускается при обнаружении любого события, которое может вызвать перегрузку.

Приложения, управляемые запросами – в отличие от приложений, управляемых событиями, где чувствительные узлы загружают данные в момент возникновения события. Здесь именно узлы-шлюзы проводят опрос и запрашивают чувствительные узлы, чтобы предоставить ответ на запрос.

Гибридные приложения – сценарии гибридных приложений в ближайшем будущем станут повсеместными. Из-за их повсеместного характера и постоянного сбора данных они генерируют огромный объем данных. Типичным сценарием является система структурного мониторинга состояния. Здесь сенсорная деятельность представляет собой измерение вибраций конструкции не дискретным образом каждым отдельным датчиком с заранее определенной частотой. Датчики загружают данные с высокой скоростью, как только обнаруживают аномалию, угрожающую работоспособности конструкции [20]. Эта ситуация может привести к перегрузке.

В [17] определены два уровня перегрузки, которые могут возникнуть в WSN.

*1. Перегрузка на уровне узла.* В этом сценарии скорость обслуживания пакетов меньше, чем скорость прибытия пакетов. Это, в свою очередь, приводит к переполнению буфера на узле. Обычно поражаются узлы, ближайшие к шлюзу. На рис. 1.1 приведен сценарий такого рода ситуации. Некоторые из выявленных проблем, связанных с перегрузкой WSN такого типа, заключаются в увеличении потерь электроэнергии и потере пакетов, что является частью проблем, на решение которых направлено диссертационное исследование. Этот тип перегрузки обычно возникает на узлах, которые находятся по соседству с узлом-шлюзом, что делает его интересным для нашего исследования контроля перегрузки на шлюзе WSN. Другими проблемами, возникающими из-за перегрузок такого рода, являются доступность сети и срок службы сети.

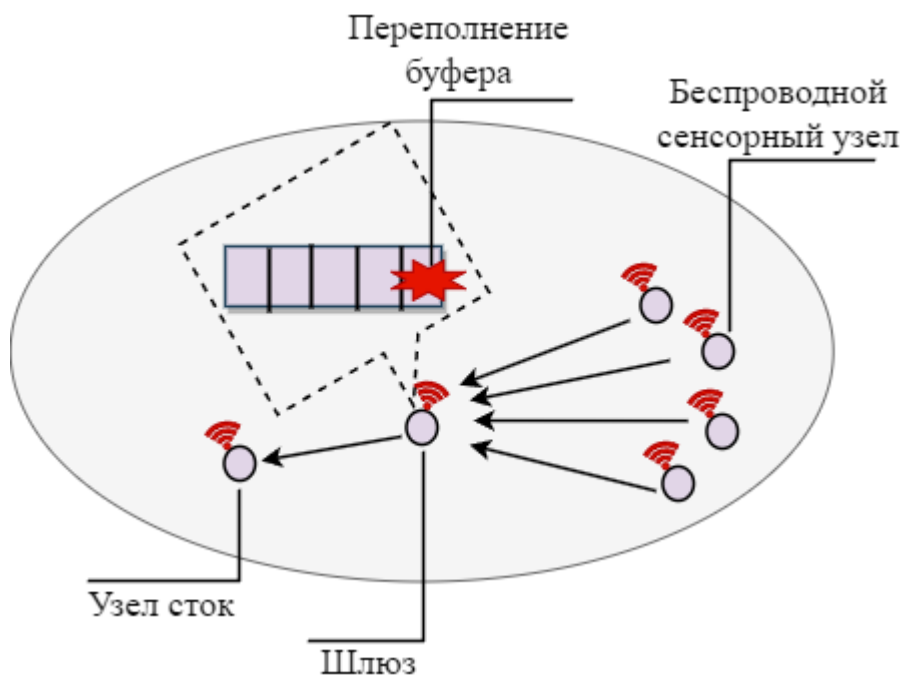


Рис. 1.1. Перегрузка на уровне узла

2. *Перегрузка на уровне канала.* Этот тип сценария перегрузки возникает, когда множество активных узлов, находящихся в пределах досягаемости, одновременно отправляют данные по каналу связи. Сценарий такого типа обычно возникает в WSN, где множество узлов, использующих протоколы, такие как множественный доступ с разделением несущей (англ. Carrier Sense Multiple Access, CSMA), совместно используют беспроводной канал для загрузки пакетов [21]–[25]. Рис.1.2. описывает сценарий на уровне канала. В результате коллизии по каналу передачи пакеты, проходящие из буфера данного узла, могут быть не доставлены на узел шлюза, тем самым вызывая снижение общей скорости доставки пакетов. Некоторыми сопутствующими эффектами такого типа перегрузки являются увеличение потерь энергии и задержка доставки пакетов путем снижения использования сетевого соединения и общей пропускной способности [26]. Для противодействия коллизиям на канальном уровне используются механизмы канального уровня передачи данных, такие как CSMA, множественный доступ с частотным разделением (англ. Frequency Division Multiple Access, FDMA), Множественный доступ с разделением по времени (англ. Time Division Multiple Access, TDMA).

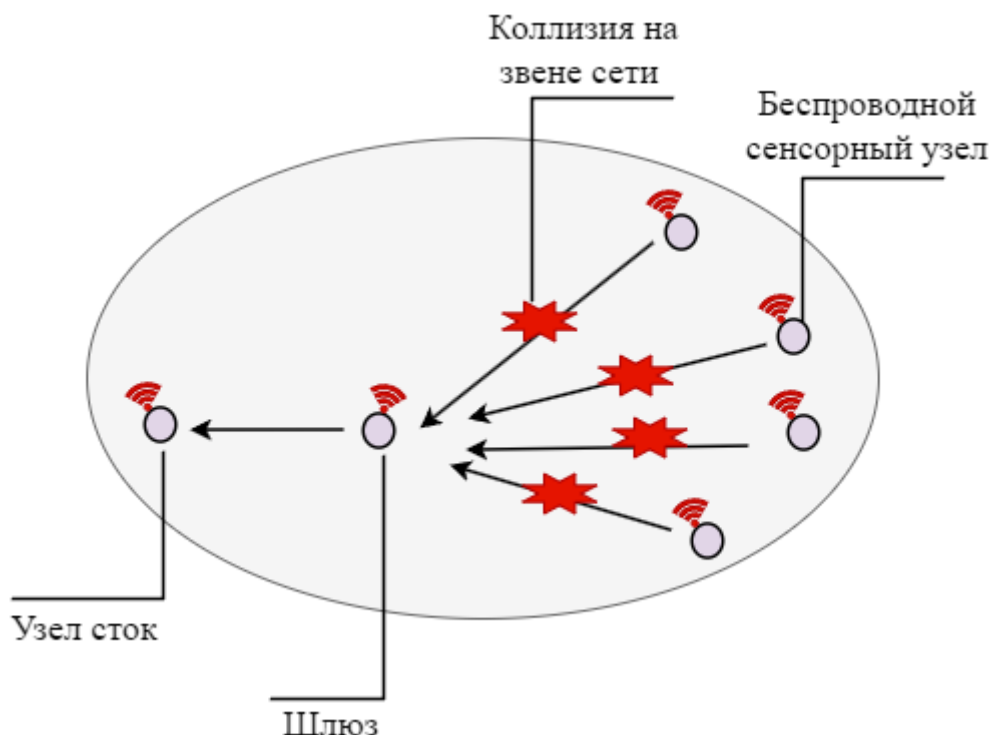


Рис. 1.2. Перегрузка на уровне канала

Поскольку беспроводные сенсорные сети и их приложения становятся повсеместными, они встречаются практически во всех сферах человеческой деятельности. В зависимости от типа потока данных существует управление пакетами, такое как легкое управление, управление на среднем уровне и жесткое управление. Известны три фазы, которые используются для уменьшения перегрузки в WSN:

*Обнаружение перегрузки.* Обзор, проведенный в [17] показал, что наиболее часто используемыми характеристиками являются: длина очереди, вероятность потери пакетов, время обслуживания пакетов, загрузка канала и задержка.

*Уведомление о перегрузке.* Когда в WSN обнаруживается перегрузка, информация пересылается узлу для принятия соответствующего решения. Существует два типа уведомлений:

1. *Неявное уведомление о перегрузке:* В этом методе перегруженные узлы используют сведения о резервном копировании, связанные с перегрузкой, в заголовке пакета полезной нагрузки, чтобы уведомлять вышестоящие узлы датчиков об их состоянии перегрузки. Ряд протоколов, связанных с контролем перегрузки, используют сигнализацию положительного подтверждения АСК для

указания состояния перегрузки. Этот метод популярен среди многих схем контроля перегрузки.

2. *Явное уведомление о перегрузке*: Здесь независимые пакеты управления отправляются перегруженными узлами датчиков узлам в восходящем режиме, тем самым уведомляя их об их состоянии перегрузки. Этот метод редко используется в схемах контроля перегрузки.

*Контроль перегрузок*. Существуют две основные категории методов контроля перегрузок: управление трафиком и управление ресурсами. В категории *управления трафиком* контроль достигается путем регулирования скорости поступления входящего трафика. При *управлении ресурсами* дополнительные ресурсы развертываются вблизи точки перегруженности, чтобы остановить перегрузку. Кроме того, дополнительная пропускная способность или узлы могут быть развернуты вокруг точки перегруженности.

Также в работе [17] была представлена классификация схем контроля перегрузок, которые были разделены на две основные категории.

(А) *Централизованные схемы контроля перегрузки*. Эта схема реализована с помощью протокола маршрутизации с контролем перегрузки. Он развертывается на приемном узле или базовой станции.

(В) *Децентрализованные схемы контроля перегрузки*. Этот тип схемы управления перегрузкой является распределенным по своей природе. Он охватывает все сенсорное поле. Алгоритм управления перегрузкой распределен по различным подпрограммам.

В статье [19] WSN описывается как совокупность пространственно-распределенных само-направленных датчиков. Датчики, как правило, ограничены низкой вычислительной мощностью и доступностью для хранения данных. Следовательно, возникает необходимость в некоторых приложениях, которые будут принимать в качестве входных данных и оценивать информацию из окружающей среды и, в свою очередь, передавать данные пользователю. Существует две категории WSN – структурированные и неструктурированные. Для неструктурированных WSN датчики развертываются специальным образом, в то

время как для структурированной сети должна быть предварительно спланирована для развертывания узлов датчиков. Рассматривались также особенности сенсорного облака. Облачная архитектура способна обеспечить открытую, расширяемую, интеллектуальную и совместимую сенсорную сеть. Интеграция облачных вычислений с WSN для предоставления перспективных решений сопряжена с определенными трудностями, такими как оперативность, гибкость, надежность, переносимость и т.д. В [19] рассмотрены некоторые области применения сенсорного облака, такие как мониторинг транспорта, военное использование, прогнозирование погоды, здравоохранение и т.д.

В работе [18] предложена новая сенсорная облачная архитектура, основанная на туманных вычислениях, разработаны архитектура и компоненты облачной системы датчиков на основе туманных вычислений, подробно описаны функциональные возможности компонентов и выдвинуты предварительные решения для виртуализации физических датчиков, динамического предоставления виртуальной сенсорной группы и примера сервиса. При решении проблем, присущих традиционной облачной системе датчиков, где полученные данные загружаются в облако, что, в свою очередь, делает обработку данных и предоставление услуг зависимыми от облака [27], в [18] предложено поддерживать приложения реального времени на слое тумана, чтобы противостоять проблемам, с которыми сталкиваются пользовательские приложения в реальном времени. Пользовательские приложения, работающие в режиме реального времени, предпочитают локальный доступ к данным, а не доступ из облака, где на сенсорном узле WSN может возникнуть перегрузка на канальном уровне, что приведет к задержке передачи, сбою в обслуживании и потере качества на уровне пользователя. Таким образом, поддержка слоя тумана удовлетворяет потребности некоторых приложений Интернета вещей, которые требуют предоставления услуг, близких к пользовательским. Среди заметных вкладов, внесенных работой [18], следует отметить.

1. Построение архитектуры облака датчиков на основе тумана путем оптимизации традиционной архитектуры облака. На рис.1.3. показана структура сенсорного облака на основе тумана.
2. Основываясь на архитектуре облака, в работе предложены компоненты облачной системы датчиков на основе тумана и подробно описываются функции компонентов.
3. В работе также предлагается двухслойное решение для виртуализации датчиков «облако-туман» для реализации прямого управления датчиками посредством виртуализации на узлах тумана и совместного использования ресурсов датчиков несколькими пользователями и приложениями посредством виртуализации в облаке.

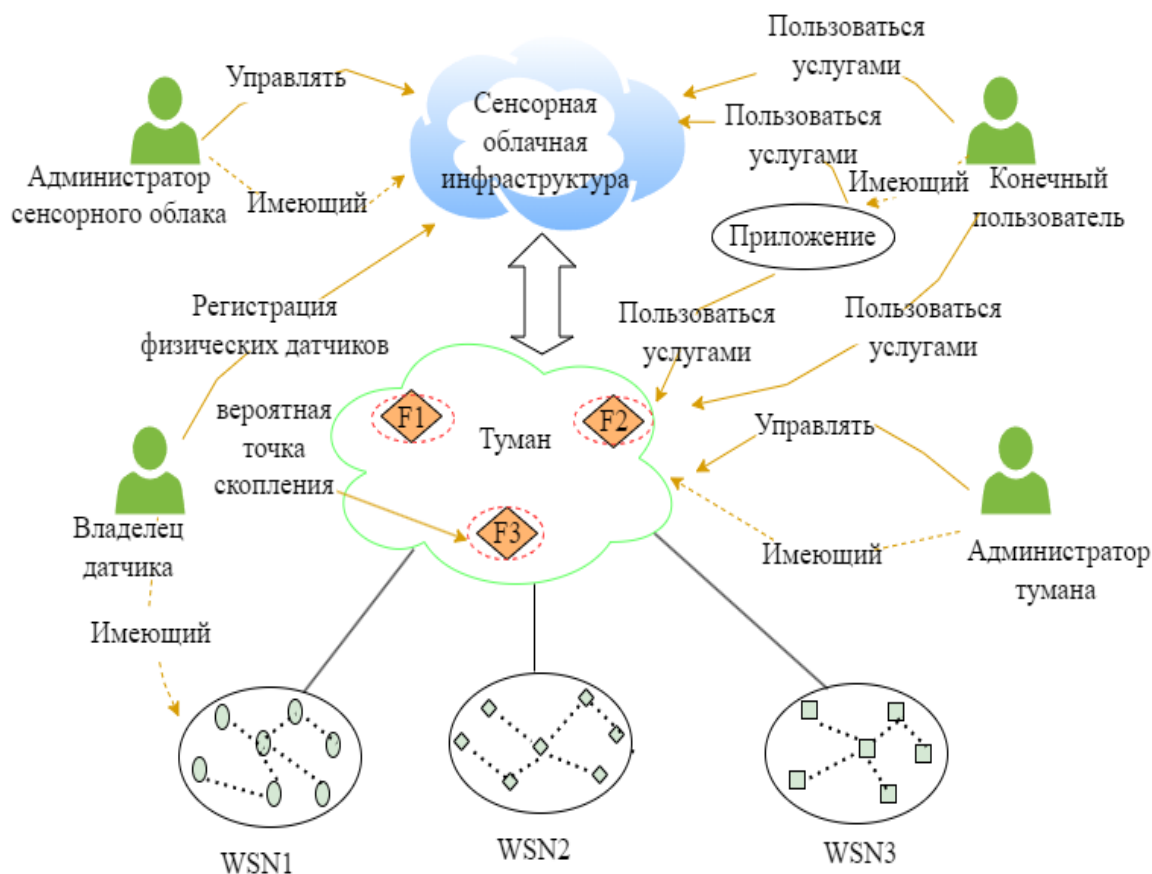


Рис. 1.3. Облачная структура датчика на основе системы туманных вычислений.

В [68] изучался нестационарный класс контроля перегрузки в буфере сетевой системы TCP/IP, в котором авторы определили, выделили и обсудили использование алгоритмов активного управления очередью (англ. Active queue



management, AQM) в беспроводных сенсорных сетях для предотвращения и смягчения перегрузки [69-72].

Технология WSN это развивающаяся парадигма, в которой используются распределенные датчики, встроенные в коммуникационные инфраструктуры для мониторинга и регистрации желаемых условий окружающей среды [28]. Эти распределенные датчики представлены в виде недорогих сенсорных узлов, которые развертываются для сбора и передачи данных самоорганизующимся способом с несколькими переходами [29]. Некоторые из различных областей применения WSN включают, но не ограничиваются ими, оказание помощи при стихийных бедствиях, сельское хозяйство, мониторинг окружающей среды, медицинские приложения и безопасность. Одной из недавних областей применения WSN, относящихся к нашему исследованию, является применение пограничного контроля [28]. Для эффективного мониторинга, оповещения и принятия решений рассматриваются механизмы из [30]. В сценарии обнаружения вторжений на сельскохозяйственные угодья рассмотрена структура, в которой поставщик предоставляет услуги шлюза WSN ряду подписанных на услугу фермеров, посредством которых сенсорные данные загружаются в базу данных, размещенную в облаке. В этом разделе мы представляем бизнес-модель, а также различные сценарии системы управления перегрузками.

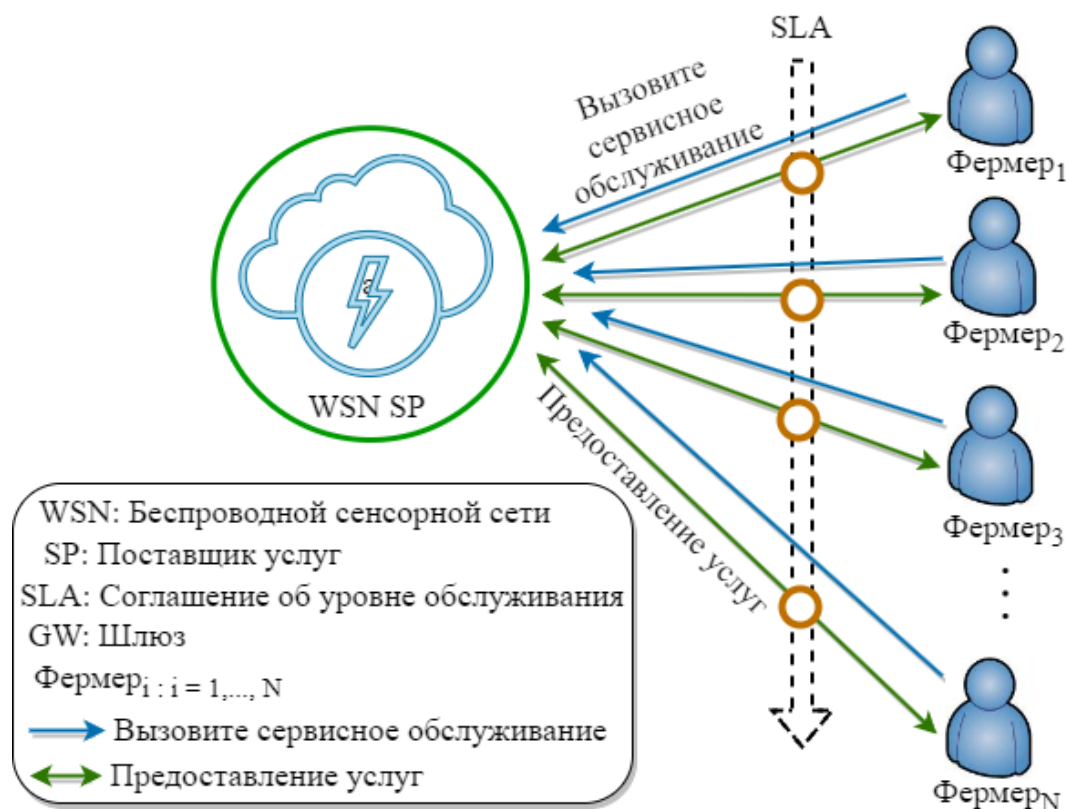


Рис. 1.4. Бизнес-модель предоставления услуг обнаружения вторжений.

Бизнес-модель, иллюстрированная на рис. 1.4, представляет собой модель типа бизнес-потребитель (англ. Business-to-Customer, B2C). В этом сценарии поставщик услуг WSN предоставляет некоторые услуги беспроводного зондирования (например, обнаружение вторжения вредителей или животных на сельскохозяйственные угодья) потребителю – фермеру на основе некоторого Соглашения об уровне обслуживания (англ. Service level agreements, SLA). Фермер инициирует транзакцию, отправляя запрос на обслуживание WSN, которая, в свою очередь, после подписания соглашения об уровне обслуживания отвечает ответом на предоставление услуги.

На рисунке 1.5. представлена компоновка среды для системы обнаружения вторжений на сельскохозяйственные угодья. Два уровня обнаружения вторжений (обнаружение уровня 1 и обнаружение уровня 2) реализованы на каждой из двух виртуальных границ зондирования (внешняя виртуальная граница (англ. Outer Virtual Boundary, OVB) и внутренняя виртуальная граница (англ. Inner Virtual Boundary, IVB)), реализованных по периметру сельскохозяйственных угодий. Настройка определяет зонирование приоритетного уровня оповещения для

пастухов и их деятельности по выпасу скота (нарушителей границы) вокруг сельскохозяйственных угодий.



Рис. 1.5. Схема системы обнаружения вторжений на сельхозугодья.

На рисунке 1.6 показана модель для системы обнаружения вторжений на сельхозугодья. В этой модели два набора беспроводных датчиков (акустические датчики и визуальные датчики) развернуты в каждой из соответствующих границ (внешняя граница и внутренняя граница), окружающих периметр сельхозугодья. Система функционирует следующим образом.

1. *Обнаружение уровня 1.* Весь трафик узлов акустики и визуальных датчиков, исходящий от внешней виртуальной границы (желтая область), перенаправляется на шлюз WSN. Трафик впоследствии загружается в базу данных, размещенную в облаке, для обработки и называется трафиком с низким приоритетом. Таким образом, это считается обычными предупредительными действиями.
2. *Обнаружение уровня 2.* Весь трафик узлов акустики и визуальных датчиков, полученный с внутренней виртуальной границы (красная область), перенаправляется на шлюз WSN для последующей загрузки в базу данных,

размещенную в облаке, для обработки и рассматривается как трафик с высоким приоритетом. Это связано с тем, что деятельность скотоводов и выпас крупного рогатого скота посягает на сохранность посевов на сельхозугодьях. Таким образом, этот высокоприоритетный трафик вызовет предупреждение об опасности, означающее высокую вероятность вторжения на сельскохозяйственные угодья.



Рис. 1.6. Системная модель WSN для обнаружения вторжений.

На рисунке 1.7 представлен агрегированный трафик, поступающий на шлюз WSN от различных ферм, которые подписаны на предоставление услуг WSN через согласованные SLA, как предписано в бизнес-модели. На этом этапе WSN определяет необходимое количество шлюзов, необходимых для удобного управления трафиком, чтобы избежать перегрузки беспроводной сенсорной сети.

Топология сети на рис. 1.7 представляет собой звездообразную топологию, реализованную как гибридная интеграция сети LoRa от различных сенсорных узлов и узкополосного интернет вещей (англ. Narrow Band-IoT, NB-IoT) на шлюзе, расположенном в центре сети. Этот сценарий аналогичен реализации в работе [31]. Решение о выборе LoRa и NB-IoT обусловлено тем фактом, что LoRa имеет

ограничение покрытия в отличие от покрытия сотовой сети LTE, для которого выделены полосы NB-IoT. Измеренные данные из двух зон обнаружения (обнаружение уровня 1 и обнаружение уровня 2) подписанного числа N сельскохозяйственных угодий передаются через шлюз в базу данных (БД), размещенную на веб-сервере в облаке, где данные обрабатываются для определения уровня приоритета данных.

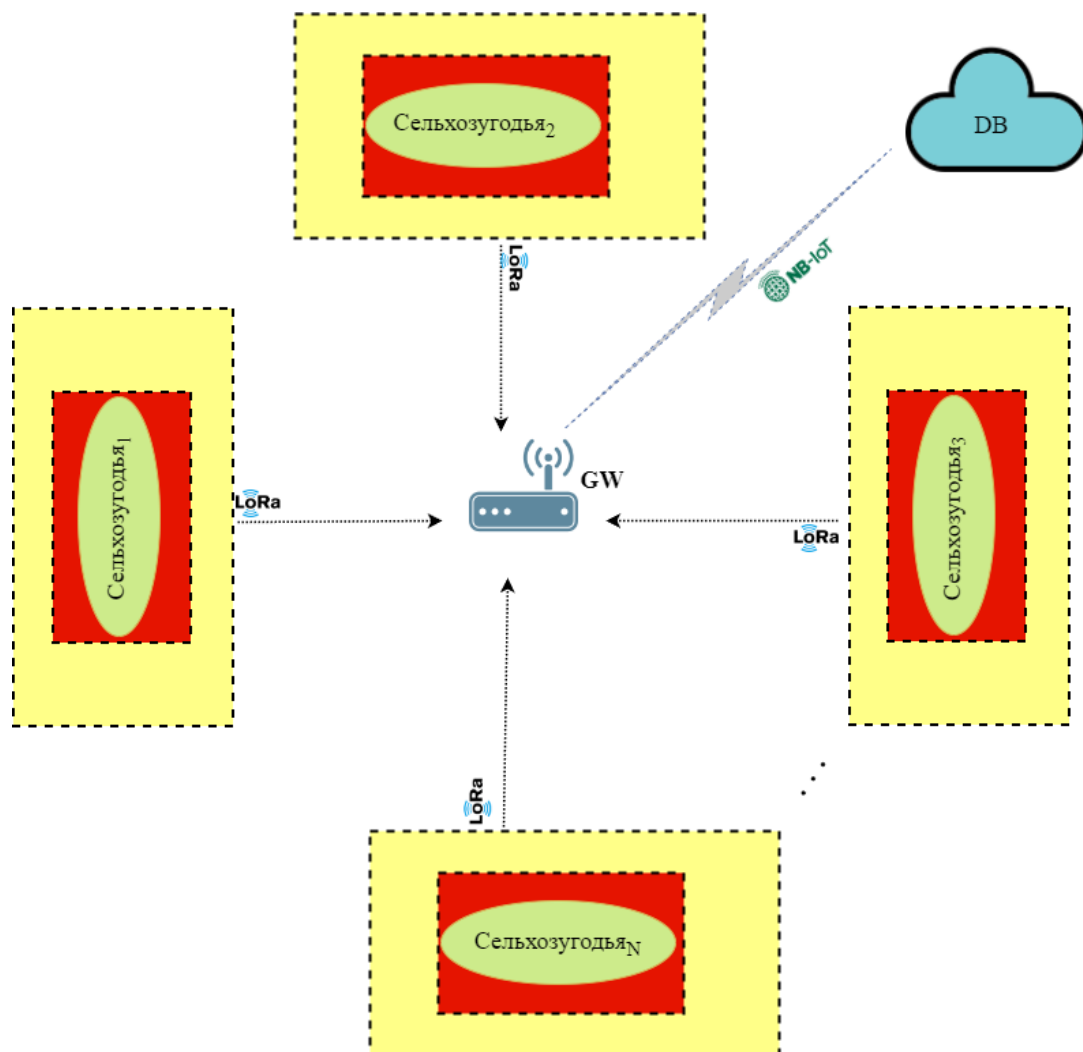


Рис. 1.7. Агрегированный трафик от ферм к шлюзу WSN.

Чтобы уменьшить возникновение перегрузок, шлюз WSN может обрабатывать данные в зависимости от реализованного протокола. Используя вышеупомянутую характеристику, сеть может быть расширена путем добавления большего числа звездных конфигураций (рис.1.7.) по мере увеличения числа подписанных на услугу сельскохозяйственных угодий.



Рис. 1.8. Схема системы контроля перегрузки

На рис. 1.8 представлена архитектурная схема контроля перегрузки для системы обнаружения вторжений на сельскохозяйственные угодья (англ. Farmland Intrusion Detection System, FIDS). По сути, архитектура контроля перегрузки (англ. Congestion control architecture, CCA) разделена на две основные части; часть обнаружения датчиков (состоящая из датчиков обнаружения уровня 1 и датчиков обнаружения уровня 2) и часть шлюза WSN.

CCA работает следующим образом: Датчики обнаружения уровня 1 – датчики из желтой зоны OVB и датчики обнаружения уровня 2 – датчики из красной зоны IVB, регистрируют действия пастухов и выпаса скота в качестве входных данных и передают сигналы в часть шлюза WSN для последующей загрузки в базу данных, размещенную на облачном виртуальном сервере. Часть шлюза состоит из трех компонентов, а именно: процессора, монитора и функции управления. Процессор – принимает входные данные от зон обнаружения двух

уровней и помещает их в буфер шлюза WSN. Монитор – функция сторожевого пса, который отслеживает статус заполнения буфера (англ. Buffer occupancy status, BOS) шлюза (BOS = 1 указывает, что буфер может вместить больше пакетов, а BOS = 0 указывает, что буфер не может вместить больше пакетов) и подает сигнал тревоги каждый раз, когда достигается значение BOS = 0, уведомляя функцию управления. Функция управления зависит от полученного уведомления от монитора, и, когда получает уведомление BOS = 1, сообщает функции управления в части обнаружения датчиков, что шлюз может принимать больше пакетов, в этот момент исполнительный механизм на узле датчика сообщает процессору узла датчика, что можно отправлять больше пакетов. В случае, если функция управления получает уведомление BOS = 0, она сообщает некоторым функциям управления от выбранных датчиков, используя циклический подход в части обнаружения датчиков, и исполнительные механизмы сообщают процессорам не отправлять пакеты на шлюз до тех пор, пока буфер шлюза не освободится для размещения большего количества пакетов. Идентификационные номера датчиков выбранных датчиков выбираются циклическим способом.

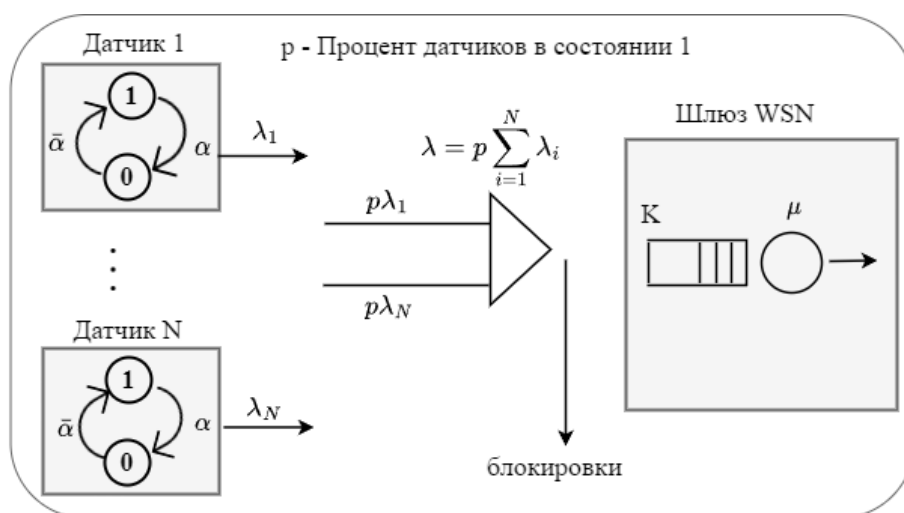


Рис. 1.9. Схема управления трафиком сенсорного узла

На рисунке 1.9. показан механизм управления трафиком от сенсорного узла (англ. Sensor Node, SN) к шлюзу WSN. Каждый SN в определенный момент времени находится либо в состоянии 1, либо в состоянии 0, соответствующем вероятностям  $\alpha$  и  $\bar{\alpha}$  соответственно. SN активен и передает, когда он находится в

состоянии 1, и наоборот, когда он находится в состоянии 0. Здесь  $\lambda_1$  – трафик от датчика 1, а  $\lambda_N$  – трафик от датчика  $N$ , в то время как  $p$  вероятность нахождения датчика в состоянии 1.

Изучив и проанализировав работы по управлению перегрузками, мы предложили гистерезисную модель управления перегрузками для уменьшения перегрузки на шлюзе WSN. Следовательно, в соответствии с лучшими практиками существует необходимость сравнить смоделированную нами систему с одним из существующих и популярных алгоритмов – IRED, чтобы оценить эффективность нашей модели. Следующий раздел 1.2 посвящен сравнительному изучению IRED и предлагаемой нами модели порогового управления перегрузками.

## **1.2 Сравнение моделей случайного раннего обнаружения перегрузки и порогового управления нагрузкой.**

Этот раздел посвящен сравнительному изучению и анализу результатов модели управления перегрузкой IRED, изученных в [32], где предложена надстройка над классическим алгоритмом управления RED, рассмотренным в [74-76], и результатов предложенной нами пороговой модели управления нагрузкой [33].

Сети WSN внедряются в различные многогранные сферы деятельности человека, начиная от автоматизации промышленных процессов, экологического зондирования, городской мобильности и систем здравоохранения. Внедрение технологий WSN в эти многогранные человеческие усилия привело к упрощению этих процессов. С целью пояснения мы попытаемся определить WSN. Согласно [34], WSN — это набор географически распределенных и надежных датчиков, которые используются для мониторинга, записи и организации физических условий окружающей среды в центральном местоположении. Некоторые из этих параметров окружающей среды включают температуру, давление, влажность, звук, уровни загрязнения, скорость и направление ветра и другие [34].

Сетевой доступ по требованию к общему пулу настраиваемых вычислительных ресурсов, характерный для сенсорных облаков, оказывает



значительное влияние на производительность (перегруженность) сервисов, которые могут быть собраны в облаке [32, 35, 36]. Поскольку WSN имеют ограниченную пропускную способность, необходимо тщательно проверять передачу данных облаками датчиков, чтобы уменьшить загрузку сети. Преимущественно работающие операционные системы реализуют TCP и UDP в своем ядре, и это вынудило разработчиков и исследователей прибегнуть к использованию TCP для обеспечения сквозной надежности (снижение потери пакетов), справедливого распределения полосы пропускания и контроля перегрузки [32], [37], [38]. Сквозные протоколы передачи данных в облаках датчиков дополняются активным управлением очередями, таким как RED, для достижения оптимального использования сети, ограниченной потери пакетов и задержки [32]. Несмотря на популярность, которую RED приобрел за эти годы в областях исследований и широкого применения в компьютерных сетях, современные исследования сосредоточены на традиционных сетевых сценариях, а не на WSN для передачи данных в облаках датчиков.

В современной литературе определены некоторые ограничения, связанные с WSN, которые необходимо смягчить следующим образом. Сетевые узлы WSN характеризуются очень ограниченными вычислительными возможностями, объемом памяти и энергетическими ресурсами. Традиционная реализация RED в качестве инструмента управления очередью требует сложной процедуры для обработки любого поступающего пакета, вычисления средневзвешенной длины очереди, прогнозирования вероятности отбрасывания и принятия решения об отбрасывании пакета. Узлы сенсорной сети рассматривают эту процедуру как узкое место, ограничивающее производительность передачи данных и сокращающее срок службы сети. Текущие исследования в области инструментов управления на основе RED в облаках датчиков сосредоточены на повышении производительности сети с минимальными затратами на управление. В соответствии с этой идеей ряд исследователей использовал теорию массового обслуживания при разработке аналитических методов оценки производительности облачных сервисов. Например, [39]–[42] использует теорию массового

обслуживания для математического моделирования сервисов облачных вычислений в соответствии с их различными тематическими исследованиями.

В этом разделе сравнительного анализа мы рассмотрели модель IRED [32] и провели сравнение между показателями производительности модели управления перегрузкой IRED и предложенным нами механизмом двух порогового управления нагрузкой. Данный механизм, как будет показано ниже, моделируется системой массового обслуживания с двух-пороговым управлением интенсивностью входящего потока по числу заявок в очереди. Сравнительный анализ показателей производительности показал, что предлагаемая нами гистерезисная модель управления нагрузкой в некоторых областях значений системных параметров более эффективна, чем модель IRED.

Ниже в этом разделе мы рассматриваем беспроводную сенсорную сеть, в которой датчики загружают информацию в облачную базу данных через шлюз. Поскольку используется один шлюз, то возникает проблема перегрузки, когда много датчиков одновременно отправляют данные в базу данных. Здесь мы рассмотрим модель гистерезисного управления для уменьшения перегрузки в WSN. На рисунке 1.10 показана упрощенная схема архитектуры сети WSN. В диссертационном исследовании работе мы рассматриваем отдельный сегмент сети, где датчики отправляют запросы на шлюз, который сохраняет новые запросы в памяти, одновременно обрабатывая текущий запрос.

Обработанные шлюзом запросы пересылаются в облачную базу данных. В случае перегрузки памяти шлюза новые запросы будут потеряны. Для решения этой проблемы предложена гистерезисная модель управления нагрузкой.

Система, как показано в [32] смоделирована в виде СМО  $M|M|n|K$  с некоторыми модификациями и с учетом полного сброса нагрузки при достижении длины очереди значения  $K$ . На систему поступает пуассоновский поток заявок с параметром  $\lambda$ , в ней имеется  $n$  серверов с экспоненциальным распределением времени обслуживания с параметром  $\mu$  каждый. На рис. 1.12 показана диаграмма переходов состояний марковского процесса, описывающего функционирование системы, из которой видны также особенности ее функционирования.

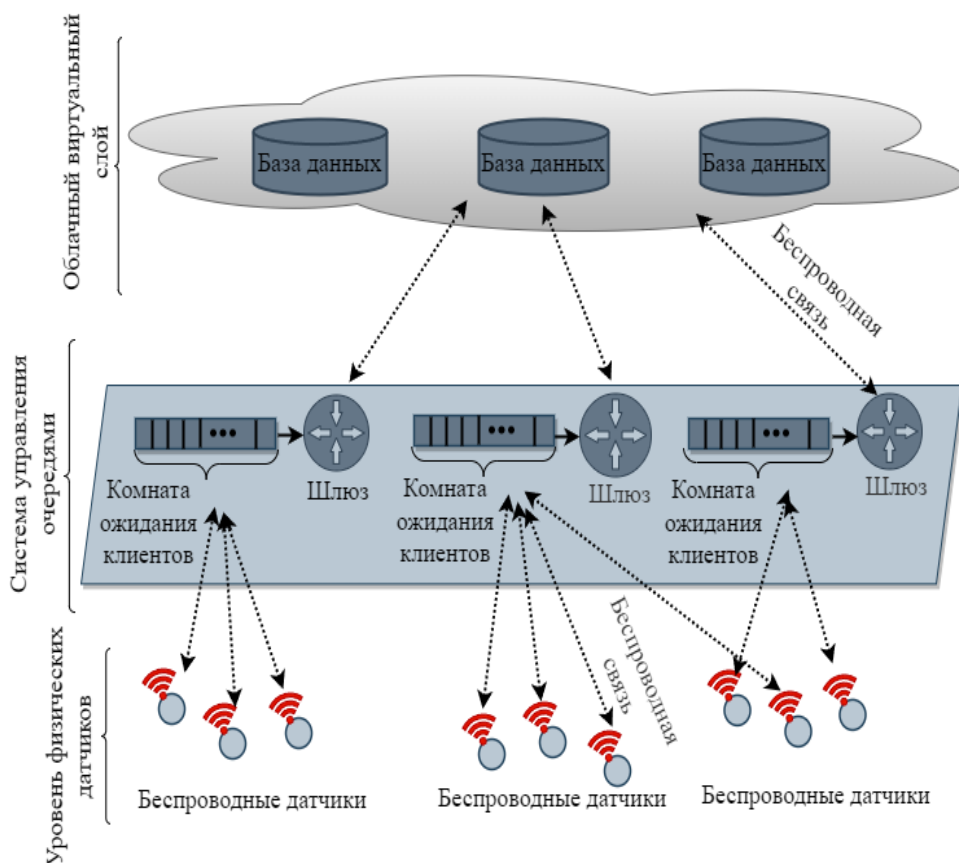


Рис. 1.10 Архитектура сети WSN

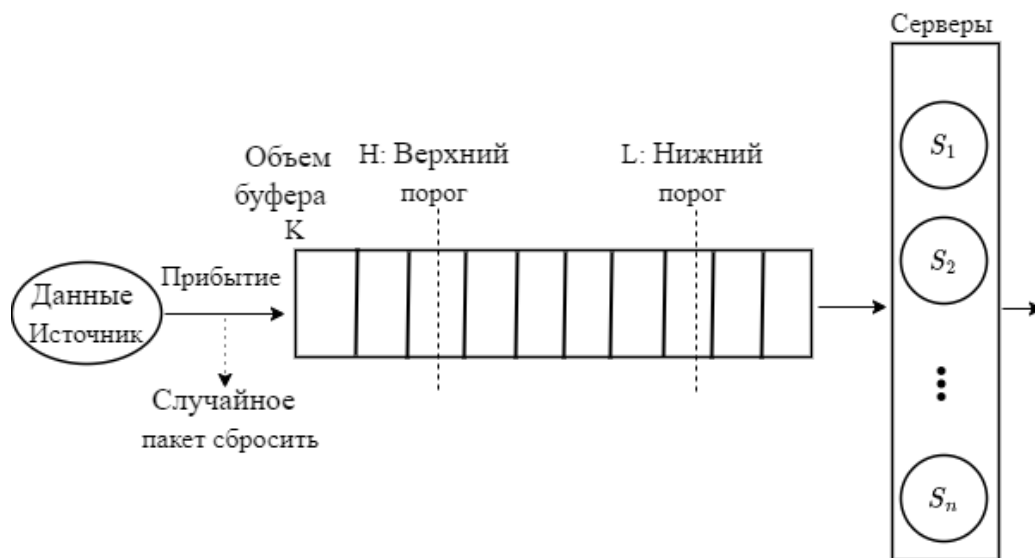


Рис. 1.11. Модель управления перегрузкой на основе IRED для передачи данных в облаке датчиков [32].

Система, схематично изображенная на рисунке 1.11, была сравнена с моделью порогового гистерезисного управления. Анализ этой системы, мы реализуем аналогично работе [16], где этот метод был применен для анализа проблемы перегрузок сервера управления установления пользовательских сессий

(т.н. сервера протокола установки сессий (англ. Session Initiation Protocol, SIP)). В главах 2 и 3 мы модифицировали этот метод для анализа перегрузок шлюза сети WSN.

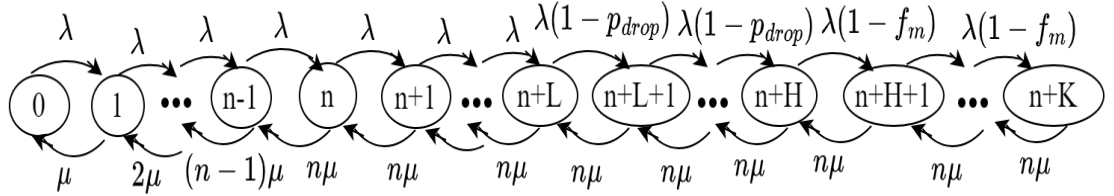


Рис. 1.12. Диаграмма перехода состояний модели IRED.

Модель системы на рис. 1.11 может быть описана с помощью диаграммы состояний переходов на рис. 1.12, где первый сегмент представляет случай, когда в системе нет запроса клиентов на обслуживание. Второй сегмент описывает систему с момента добавления первого запроса клиента на обслуживание до тех пор, пока все приборы не будут исчерпаны. Третий сегмент описывает очередь в пределах установленного минимального порога  $L$  и, наконец, четвертый сегмент показывает очередь до порога  $H$ , где пакеты сбрасываются с заданной вероятностью

$$p_{drop}(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq k < L, \\ \frac{(k-L)^2}{(H-L)^2} f_m, & \text{if } L \leq k < H, \\ f_m, & \text{if } L \leq k < K. \end{cases} \quad (1.1)$$

Система уравнений равновесия (СУР) для модели IRED имеет следующий вид.

$$\lambda p_0 = \mu p_1, \quad k = 0, \quad (1.2)$$

$$\lambda p_{k-1} + (k+1)\mu p_{k+1} = (\lambda + k\mu)p_k, \quad 1 \leq k \leq n, \quad (1.3)$$

$$\lambda p_{k-1} + n\mu p_{k+1} = (\lambda + n\mu)p_k, \quad n < k \leq L, \quad (1.4)$$

$$\lambda(1-f(k-1))p_{k-1} + n\mu p_{k+1} = (\lambda(1-f(k+1)) + n\mu)p_{k+1}, \quad L < k \leq H, \quad (1.5)$$

$$\lambda(1-f_m)p_{k-1} + n\mu p_{k+1} = (\lambda(1-f_m) + n\mu)p_{k+1}, \quad H < k \leq K - 1, \quad (1.6)$$

$$\lambda(1 - f_m)p_{k-1} = n\mu p_k, k = K, \quad (1.7)$$

$$\text{где } f(k) = \left( \frac{(k-L)^2}{(H-L)^2} \right) f_m. \quad (1.8)$$

Из СУР стационарные вероятности могут быть получены в виде

$$p_i = \frac{\lambda^i}{i! \mu^i} \cdot p_0, i = 1, \dots, n, \quad (1.9)$$

$$p_i = \frac{\lambda^{(i-n)}}{n^{(i-n)} \mu^{(i-n)}} \cdot \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} p_0, i = n + 1, n + 2, \dots, n + L, \quad (1.10)$$

$$p_{(n+L+1)} = \frac{\lambda^i (1 - p_{drop}(k))^i}{n^i \mu^i} \cdot \frac{\lambda^L}{n^L \mu^L} \cdot \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} p_0, i = 1, 2, \dots, H - L, \quad (1.11)$$

$$p_{(n+H+1)} = \frac{\lambda^i (1 - f_m)^i}{n^i \mu^i} \cdot \frac{\lambda^H (1 - p_{drop}(k))^H}{n^H \mu^H} \cdot \frac{\lambda^L}{n^L \mu^L} \cdot \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} p_0, \quad (1.12)$$

$$i = 1, 2, \dots, K - H.$$

Или в упрощенной форме:

$$p_i = \frac{\lambda^i}{i! \mu^i} p_0, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.13)$$

$$p_i = \frac{\lambda^{(i-n)}}{n^{(i-n)} \mu^{(i-n)}} p_n, i = n + 1, n + 2, \dots, n + L, \quad (1.14)$$

$$p_{(n+L+i)} = \frac{\lambda^i (1 - p_{drop}(k))^i}{n^i \mu^i} \cdot p_{(n+L)}, i = 1, 2, \dots, H - L, \quad (1.15)$$

$$p_{(n+H+i)} = \frac{\lambda^i (1 - f_m)^i}{n^i \mu^i} \cdot p_{(n+H)}, i = 1, 2, \dots, K - H. \quad (1.16)$$

Пусть  $\rho = \lambda/\mu$  и, тогда, окончательно получаем

$$p_k = \begin{cases} \rho p_0, k = 1, \\ \frac{\rho^k}{k!} p_0, 1 < k \leq L, \\ \frac{\rho^k}{n^{(k-n)} n!} p_0, n < k \leq L, \\ \prod_{i=L}^{k-1} (1 - f(i)) \frac{\rho^k p_0}{n^{(k-n)} n!}, L < k \leq H, \\ \prod_{i=L}^{H-1} (1 - f(i)) \frac{(1 - f_m)^{(k-H)} \rho^k p_0}{n^{(k-n)} n!}, H < k \leq K. \end{cases} \quad (1.17)$$

Из условия нормировки  $\sum_{i=0}^K p_k = 1$  находим, что

$$p_0 = \frac{1}{A + B + C + D} \quad (1.18)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!}, B = \sum_{k=n+1}^h \frac{\rho^k}{n^{(k-n)} n!}, \\ C &= \sum_{k=L+1}^H \prod_{i=L}^{k-1} (1 - f(i)) \frac{\rho^k}{n^{(k-n)} n!}, \\ D &= \sum_{k=H+1}^K (1 - f_m)^{(k-H)} \prod_{i=L}^{H-1} (1 - f(i)) \frac{\rho^k}{n^{(k-n)} n!}. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Исследуемыми показателями качества являются средняя длина очереди, приведенная в формуле (1.20), и средняя задержка пакета (Утверждение 1).

$$Q = \sum_{k=0}^K k p_k. \quad (1.20)$$

**Утверждение 1.** Средняя задержка пакета может быть вычислена по формуле.

$$W = \frac{\sum_{k=0}^K k p_k}{\lambda \sum_{k=0}^{K-1} (1 - p_{drop}(k)) p_k}. \quad (1.21)$$

**Доказательство.**

По закону Литтла имеем, что

$$W = \frac{Q}{\bar{\lambda}}, \quad (1.22)$$

где  $\bar{\lambda}$  – средняя эффективная скорость поступления, которая может быть получена из диаграммы на рис. 1.12 в виде формулы (1.23)

$$\bar{\lambda} = \sum_{k=0}^{L-1} \lambda p_k + \sum_{k=L}^{H-1} \lambda f(k) p_k + \sum_{k=H}^{K-1} \lambda f_m p_k. \quad (1.23)$$

Используя (1.1), это уравнение можно записать в виде

$$\bar{\lambda} = \lambda \sum_{k=0}^{K-1} (1 - p_{drop}(k)) p_k, \quad (1.24)$$

**и утверждение доказано.**

Вероятность потери пакета может быть рассчитана по формуле

$$P = P_{L_1} + P_{L_2} + P_K, \quad (1.25)$$

где

$$P_{L_1} = \sum_{k=L}^{H-1} p_k f(k), \quad P_{L_2} = \sum_{k=H}^{K-1} p_k f_m, \quad \text{and } P_K = p_K. \quad (1.26)$$

Численный анализ сравнил предложенную модель гистерезисного управления гистерезисом с моделью IRED из работы [32]. Исходные данные для анализа представлены в таблице 1.1. Поскольку в обеих моделях используются нижний и верхний пороговые значения, исходные данные для обеих систем можно считать согласованными. Вероятность отбрасывания  $f_m$ , используемая в IRED, рассчитана как дополнительная вероятность принятия запроса в режиме системы с гистерезисным управлением и с пониженной нагрузкой,  $f_m = 1 - p$ .

Таблица 1.1 Исходные данные

Параметр	величина	Описание
K	40	Размер буфера
L	10	Порог нижний
H	30	Порог верхний
P	0.1	Вероятность принятия

$\rho$	0.9	Нагрузка системы
--------	-----	------------------

На рис. 1.16 – 1.17 показаны графики основных характеристики системы, в сравнении двух рассматриваемых моделей.

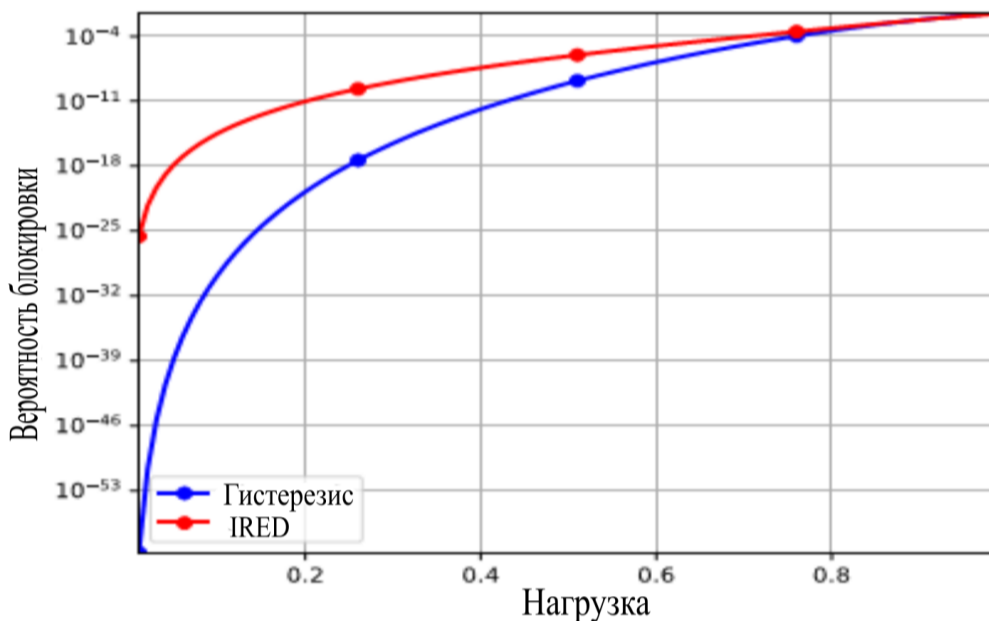


Рис. 1.16 Вероятность блокировки пакета

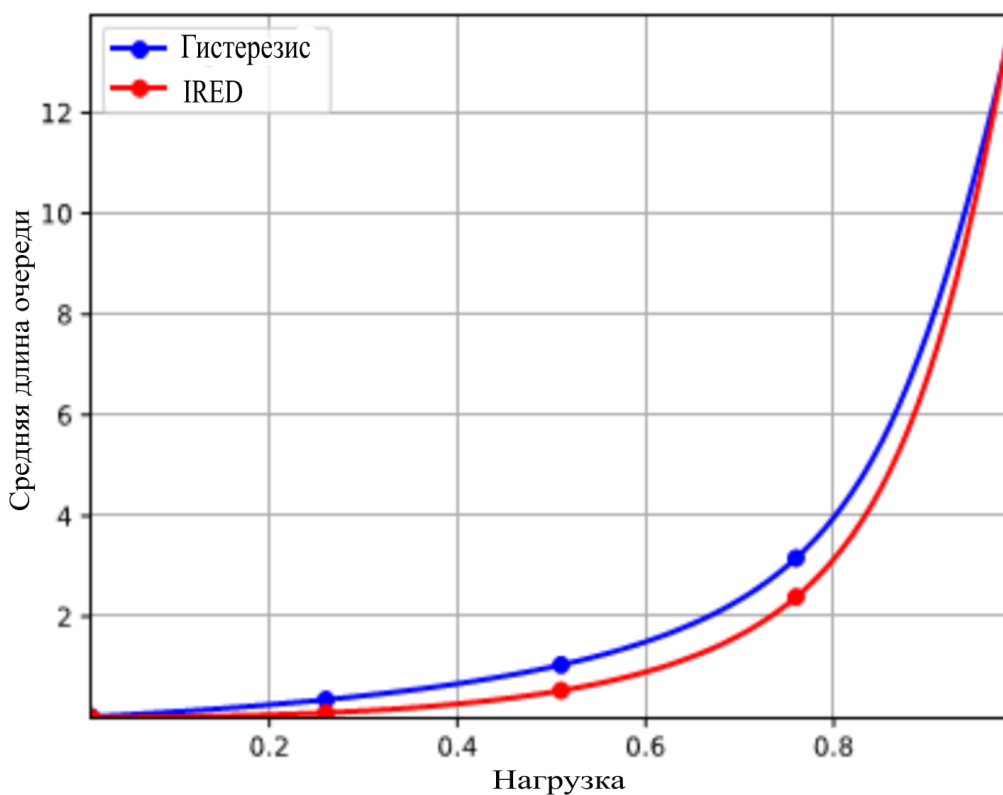


Рис. 1.17 Средняя длина очереди

На рис. 1.16 показана вероятность блокировки вновь поступающего запроса в логарифмическом масштабе, чтобы облегчить детальную визуализацию и



понимание поведения двух алгоритмов снижения нагрузки. На рис. 1.17 показано среднее число запросов в очереди. Можно заметить, что вероятность блокировки для гистерезисного алгоритма немного ниже, чем для алгоритма IRED. В то же время средняя длина очереди выше. Следовательно, это означает, что гистерезисный алгоритм отклоняет меньшее количество запросов, сохраняя при этом систему относительно пустой, поскольку средняя длина очереди достигает всего 8 запросов при нагрузке 0,9.

### **1.3 Постановка задачи по исследованию контроля перегрузки шлюза беспроводной сенсорной сети**

Таким образом, задача состоит в построении и анализе моделей систем массового обслуживания с пороговым управлением очередью, которые на практике описывают поведение беспроводной распределенной сенсорной сети в условиях перегрузок. Очередь в данной модели соответствует очереди сообщений, передаваемых через шлюз в базу данных, расположенную в облачной системе.

Во-первых, должна решаться задача для модели с одним уровнем управления. Здесь необходимо определить построение МП, описывающего систему, найти для него стационарное распределение и вероятностные характеристики – вероятность сброса пакета и среднее время его пребывания в системе. Эта задача, включая численный анализ решена в главе 2 диссертационной работы.

Во-вторых, необходимо анализировать перегрузки в беспроводной сети в условиях многопорогового управления, что позволит более гибко осуществлять контроль за функционированием системы. Решению этой задачи посвящена глава 3. Здесь, в отличие от главы 2, исследуются характеристики МП в переходном режиме. В том числе, в работе предложен метод расчета функции распределения вероятности пребывания системы в подпространствах состояний марковского процесса.

## **ГЛАВА 2 МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ С ПОРОГОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ОЧЕРЕДЬЮ**

### **2.1 Модель массового обслуживания с двухуровневым пороговым управлением**

WSN и облачные вычисления — это новые технологии, соответственно, в области распределённых сетевых и вычислительных технологий. Сенсорное облако объединяет WSN и облачные вычисления в расширенную форму облачной инфраструктуры, которая управляет датчиками, расположенными по всей WSN. Сеть играет решающую роль в облачных вычислениях и становится особенно сложной проблемой в сенсорных облаках из-за ограниченных ресурсов WSN, как базовой сети облачной инфраструктуры. Таким образом, передача данных с датчиков на серверы сенсорного облака должна контролироваться, чтобы избежать перегрузки сети. В диссертационном исследовании рассматривается контроль перегрузки в сенсорных облаках на основе метода гистерезисного управления нагрузкой. Предложен механизм двух-порогового гистерезисного управления нагрузкой и разработана модель массового обслуживания для анализа оценки производительности предлагаемой схемы управления перегрузкой. Анализ показывает, что гистерезисное управление нагрузкой обеспечивает достаточную полосу пропускания для передачи данных. Достаточно просто реализуемый механизм управления, и низкая сложность предлагаемого алгоритма делают его приемлемым для беспроводных сенсорных сетей. В исследовании предложена модель СМО с гистерезисным управлением нагрузкой для аналитического моделирования контроля перегрузки на шлюзе беспроводной сенсорной сети.

В ходе исследовательской работы было обнаружено, что во многих случаях передача данных в облачной инфраструктуре является узким местом [43], [44]. Это становится еще более сложной проблемой в случае сенсорных облаков, где большой объем данных, собранных датчиками, должен передаваться через шлюз WSN. Проблема построения и эффективности сенсорных облаков рассматривалась в [18], [19]. Из-за ограничений пропускной способности в WSN необходимо

тщательно контролировать передачу данных в облаках датчиков, чтобы избежать перегрузки.

Для того, чтобы тщательно отслеживать и уменьшать перегрузку в этом сценарии использования системы вторжения на сельскохозяйственные угодья. Мы рассмотрели СМО типа  $M|M[1] < L, H > |K$ , которые имеют те же характеристики, что и изображенная на рис. 1.13., где  $K$  – объем буферной памяти,  $L$  – порог нижнего уровня и  $H$  – порог верхнего уровня контроля перегрузки.

В модели рассматривался сценарий с двумя границами (внешней и внутренней), окружающих периметр сельскохозяйственных угодий. На каждой из границ расположены кластеры беспроводных датчиков, которые обнаруживают перемещение злоумышленников (например, крупного рогатого скота) и передают полученные данные через шлюз в базу данных, размещенную на виртуальном уровне облака. Трафик, поступающий от датчиков внешней границы, рассматривается как трафик с низким приоритетом, в то время как трафик, поступающий от датчиков внутренней границы, рассматривается как высокоприоритетный. Данные обрабатываются в виртуальном облаке, и предупреждающие сообщения отправляются в назначенное правительственное учреждение и на мобильный телефон фермера при получении трафика с высоким приоритетом (показатель вероятности вторжения).

На рисунке 2.1 показана схема модели системы. Чтобы эффективно отслеживать и уменьшать перегрузку в системе, мы разместили нашу гистерезисную модель управления перегрузкой на шлюзе WSN. В этом исследовании мы уже провели сравнительный анализ между предложенной нами гистерезисной моделью управления и моделью IRED, изученной в [32].

Поскольку WSN имеют различный и расходящийся диапазон запросов в реальной человеческой деятельности, то в работе был рассмотрен и представлен еще один вариант использования, когда в качестве динамических шлюзов развернут набор беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

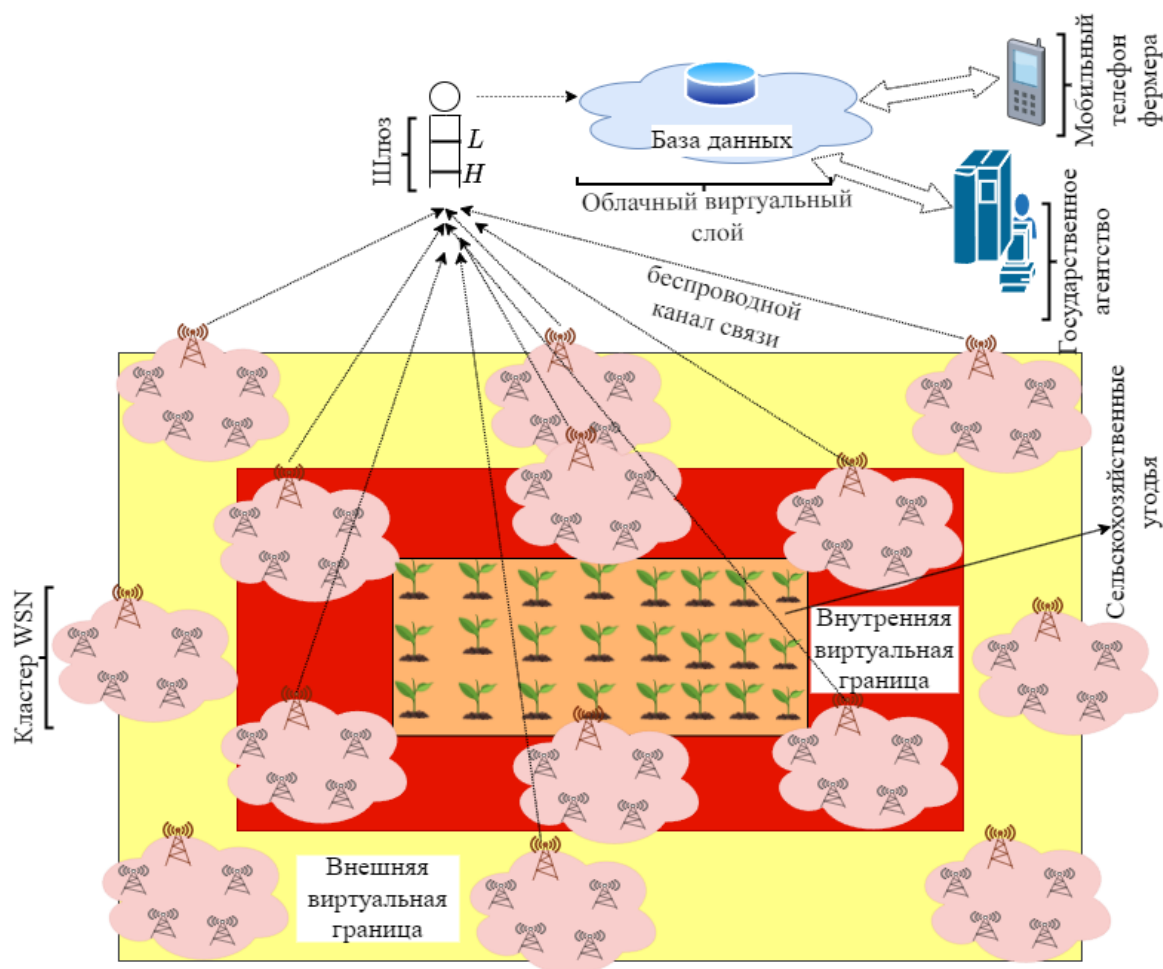


Рисунок 2.1. Облачные WSN для обнаружения вторжений на сельскохозяйственные угодья

Автономный характер WSN в сочетании с их способностью воспринимать, обрабатывать и передавать данные об окружающей среде на базовую станцию сотовой сети [25] способствует их широкому распространению. Согласно аналитике Интернета вещей [46], более 14,4 миллиарда датчиков взаимодействуют с помощью беспроводных сенсорных сетей. Такое количество устройств Интернета вещей может привести к перегрузке сети (см., например, [47]), особенно с учетом растущего числа устройств, использующих технологию беспроводной сенсорной сети. По данным Cisco Systems [48], в 2023 году прогнозируется около 14,7 миллиарда активных подключений Интернета вещей, включая датчики, носимые устройства, смартфоны, беспилотные транспортные средства и БПЛА. При отсутствии управления трафиком в беспроводных сенсорных сетях возможны частые и длительные перегрузки. Эта особенность исследуется в диссертационной

работе с использованием сравнительного анализа производительности сети, основанного на схеме управления гистерезисной нагрузкой [33], [49] и схеме IRED [32]. Именно перегрузки в беспроводной сенсорной сети стали предметом изучения данной исследовательской работы.

Рассматривается сценарий, в котором датчики, расположенные в пределах заданной области, передают информацию центральному узлу, ответственному за ее хранение и обработку. Для сбора данных с датчиков используются шлюзы, размещенные на патрулирующих территорию беспилотных летательных аппаратах, аналогично одному из случаев, рассмотренных в [33] и более подробно в [50].

Модель системы представляет собой беспроводную сенсорную сеть, в которой кластер беспроводных датчиков загружает полученные данные об окружающей среде через шлюз в базу данных (БД), размещенную в облаке. Архитектура сети, как показано на рис. 2.2., включает в себя три уровня: уровень физического восприятия, где датчики собирают данные об окружающей среде, такие как температура, влажность, солнечный свет; уровень виртуального облака, где расположены базы данных, на которые передается информация, собранная датчиками для хранения; пользовательский уровень, где имеется интерфейс прикладного программирования (англ. Application Programming Interface, API) для взаимодействия с базой данных. Передача данных между первым и вторым уровнями осуществляется через шлюз, на котором размещена система управления нагрузкой, которая отслеживает и снижает нагрузку для предотвращения перегрузок.

В этом сценарии рассматривается схема гистерезисного управления нагрузкой с двумя пороговыми значениями [33] для предотвращения перегрузок шлюза, которые могут привести к переполнению его памяти. Этот сценарий и является основной целью диссертационной работы.

Рассматриваемая WSN моделируется системой массового обслуживания типа  $M|M|1|K$  с гистерезисным управлением нагрузкой [51]. Система с одним устройством, накопителем заявок емкости  $K$  и экспоненциальным обслуживанием

с параметром  $\mu$  получает пуассоновский поток запросов, соответствующих пакетам данных от датчиков с интенсивностью  $\lambda$ . Мы считаем, что запросы сохраняют свое место в очереди до окончания обслуживания.

График интенсивности поступающего пуассоновского потока  $\lambda(s, n)$ , имеет те же характеристики, что и график, изображенный на рис. 2.3. Здесь  $s \in 0,1,2$  – состояния управления системой,  $s = 0$  соответствует состояниям, когда управление отключено,  $s = 1,2$  – состояния перегрузки первого или второго уровня,  $n$  – количество запросов в очереди. Предполагается, что в состоянии нормальной загрузки сервер может обрабатывать поток сообщений интенсивностью  $\lambda$ , и когда общая длина очереди  $n$  достигает значения  $N$  верхнего порога управления перегрузкой, нагрузка уменьшается до значения  $\lambda^* = \lambda r$ , где  $r$  – вероятность сброса вновь пришедшего пакета.

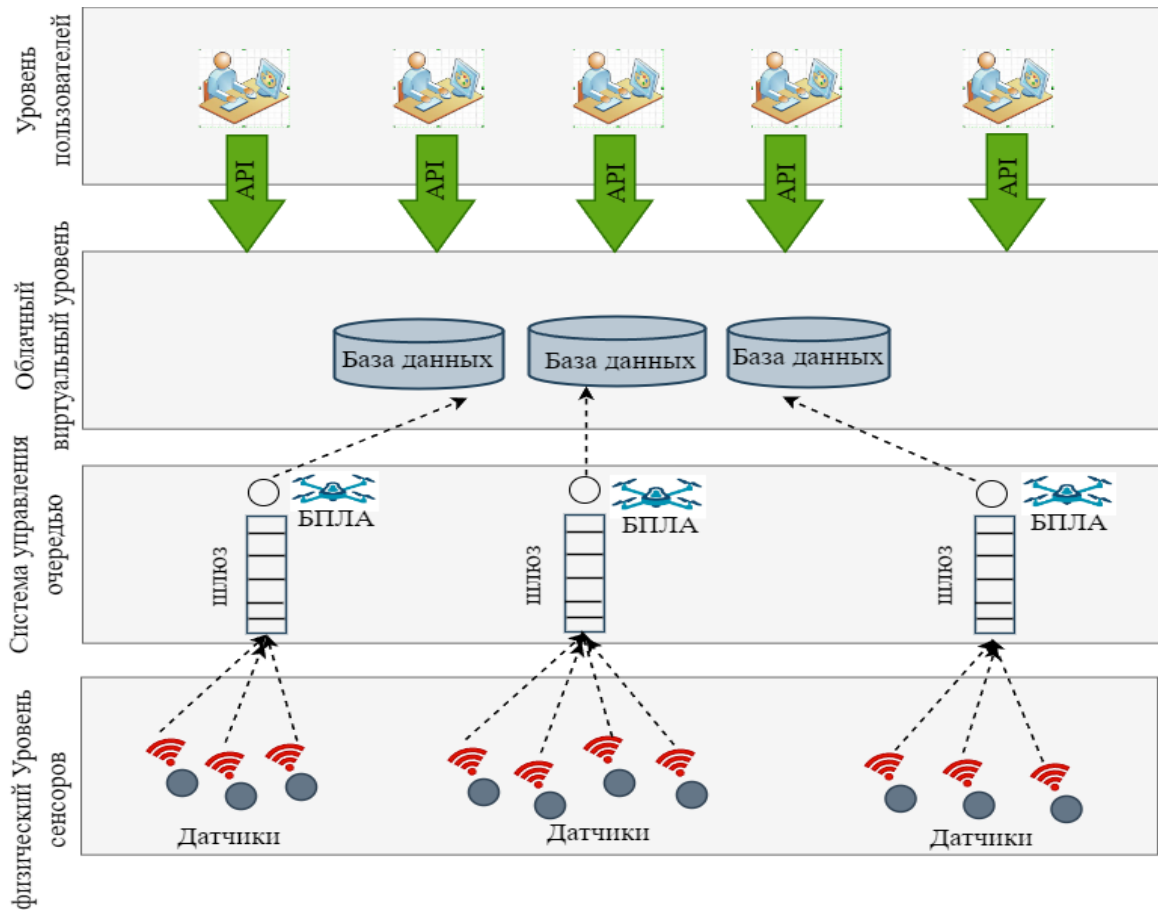


Рис. 2.2. Схема модели системы WSN на базе беспилотного летательного аппарата

Для контроля перегрузок в системе используются два порога: нижний порог  $L$  и верхний порог  $N$ . Система работает в трех режимах: нормальный режим работы

( $s = 0$ ), режим пониженной нагрузки ( $s = 1$ ) и режим блокировки ( $s = 2$ ). Когда количество запросов в системе превышает верхний порог  $H$ , система переключается в режим пониженной нагрузки ( $s = 1$ ). Нагрузка, поступающая в систему в этом режиме, снижается до уровня  $\lambda^* = (1 - p)\lambda$ , при этом часть нагрузки  $p\lambda$  сбрасывается, таким образом,  $p$  – это вероятность сброса нового пакета, когда система находится в режиме пониженной нагрузки. Система продолжает находиться в режиме пониженной нагрузки либо до тех пор, пока система не будет заполнена, либо до тех пор, пока количество запросов в очереди не достигнет нижнего порога  $L$ . В первом случае система переключится в режим блокировки ( $s = 2$ ) и перестанет принимать новые запросы, но продолжит обслуживать запросы, уже находящиеся в системе. Система будет оставаться в этом состоянии до тех пор, пока количество запросов не упадет до верхнего порога, после чего она вернется в режим пониженной нагрузки ( $s = 1$ ). Во втором случае нагрузка на систему будет восстановлена до исходной, и система переключится в нормальный режим работы ( $s = 0$ ).

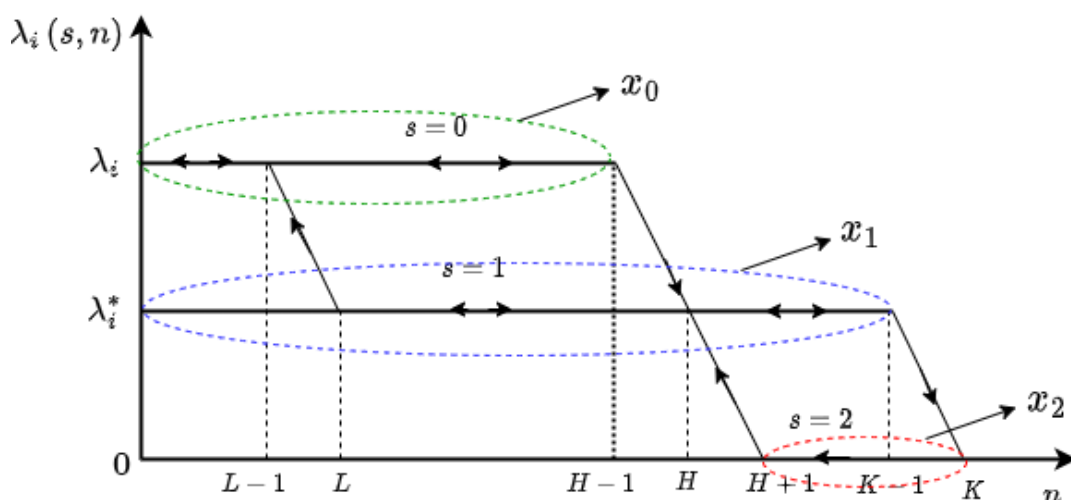


Рис. 2.3 Гистерезисное управление нагрузкой трафика на уровне шлюза.

Функционирование системы описывается МП  $X(t)$  в пространстве состояний  $\mathcal{X} = \{(n, s): s \in \{0, 1, 2\}, n \in \{0, \dots, K\}\}$ , который представлен в виде разбиения

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cup \mathcal{X}_1 \cup \mathcal{X}_2,$$

где  $X_0 = \{(0, n) : n = 0, \dots, H - 1\}$  – множество состояний нормальной работы;  
 $X_1 = \{(1, n) : n = L, \dots, K - 1\}$  – множество состояний пониженной нагрузки;  
 $X_2 = \{(2, n) : n = H + 1, \dots, K\}$  — множество блокирующих состояний. Рисунок 2.3 иллюстрирует диаграмму интенсивностей переходов состояний МП  $X(t)$ .

Решив систему уравнений равновесия для МП  $X(t)$ , мы получаем стационарное распределение  $p_{s,n}, (s, n) \in X$ , с помощью которого могут быть явно представлены следующие вероятностно—временные характеристики:  $B(X_0) = \sum_{n=0}^{H-1} p_{0,n}$  – вероятность того, что система работает в режиме нормальной нагрузки;  
 $B(X_1) = \sum_{n=L}^{K-1} p_{1,n}$  – вероятность того, что система работает в режиме пониженной нагрузки и некоторые запросы будут сброшены;

## 2.2 Система уравнений равновесия и стационарное распределение

Рассмотрим систему управления очередями типа  $M|M|1| < L, H > |K$ , как показано на рис. 2.4. В этой модели  $K$  – размер буферной памяти,  $L$  – нижний порог,  $H$  – верхний порог управления перегрузкой и  $\mu$  экспоненциальный параметр обслуживания. Система схематично изображена на рис. 2.3 и имеет входящие пуассоновские потоки с интенсивностями  $\lambda$  и  $\lambda^*$ , которые соответствуют нормальному и сниженному по трафику потокам соответственно. Также на рис. 2.3 показаны различные состояния системы, в которых;  $s = 0$  (зеленый цвет) обозначает состояния нормальной нагрузки  $X_0$ ,  $s = 1$  (синий цвет) обозначает состояния пониженной нагрузки  $X_1$  и  $s = 2$  (красный цвет) обозначает состояния блокировки  $X_2$  системы. На рис. 2.5 показана диаграмма переходов состояний системы с гистерезисным управлением нагрузкой. Здесь  $X_0, X_1, X_2$  являются подмножествами уравнения (2.2).

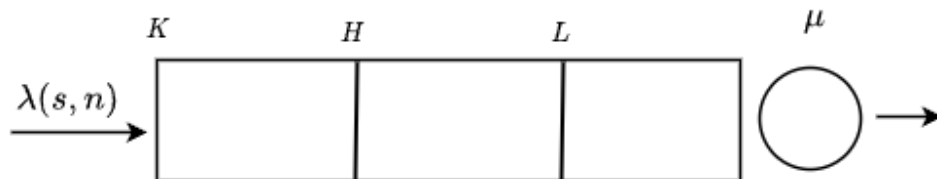


Рис. 2.4. Схема модели массового обслуживания  $M|M|1| < L, H > |K$  с пороговым управлением.



Система смоделирована как модель массового обслуживания  $M|M|1|K$  с одним сервером и  $K$  местами в очереди. Время прибытия соответствует распределению Пуассона с параметром  $\lambda$ , а время обслуживания экспоненциально распределяется со скоростью  $\mu$ . Система также включает в себя два порога – нижний порог  $L$  и верхний порог  $H$ . Когда количество запросов в системе достигает порога  $H$ , вновь поступивший запрос отклоняется с заданной вероятностью, так что параметр потока прибытия изменяется на  $\lambda^* < \lambda$ . Когда количество запросов достигает  $K$ , любой новый запрос отклоняется из-за нехватки свободного места в системе. Запросы отклоняются до тех пор, пока количество запросов в системе не упадет до  $H$ , после чего система снова принимает уменьшенный поток поступления  $\lambda^*$ . Когда количество запросов в системе падает ниже  $L$ , принимаются все вновь прибывающие клиенты и поток прибывающих восстанавливается до его первоначального значения  $\lambda$ . Таким образом, система может работать в одном из трех режимов: обычный режим, когда принимаются все новые запросы, режим пониженной нагрузки, когда поток поступающих уменьшается за счет отклонения некоторых запросов, и режим отказа, когда отклоняются все поступающие запросы. Такая система, изученная в [16], может быть описана МП  $X(t)$  с пространством состояний

$$\mathcal{X} = \{(s, n), s \in \{0, 1, 2\}, n \in \{0, \dots, K\}\}, \quad (2.1)$$

где  $s$  – системный режим, а  $n$  – количество запросов в системе. Однако для рассматриваемой системы существует только один тип трафика, что значительно сокращает пространство состояний. Диаграмма переходов состояний для описываемой системы представлена на рис. 2.5. Полученное пространство состояний может быть разделено на три подмножества в соответствии с указанными режимами:

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cup \mathcal{X}_1 \cup \mathcal{X}_2, \quad (2.2)$$

где

$$\mathcal{X}_0 = \{(s, n): s = 0, 0 \leq n \leq H - 1\}, \quad (2.3)$$

$$\mathcal{X}_1 = \{(s, n): s = 1, L \leq n \leq K - 1\}, \quad (2.4)$$

$$\mathcal{X}_2 = \{(s, n): s = 2, H + 1 \leq n \leq K\}. \quad (2.5)$$

Поскольку интенсивность поступления изменяется в зависимости от режима системы, который, в свою очередь, зависит от количества запросов в системе, то интенсивность поступления запросов может быть представлена как функция

$$\lambda(s, n) = \begin{cases} \lambda, & (s, n) \in \mathcal{X}_0, \\ p\lambda, & (s, n) \in \mathcal{X}_1, \\ 0, & (s, n) \in \mathcal{X}_2, \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $p$  - вероятность принятия запроса в режиме пониженной загрузки системы. Поведение интенсивности поступления в зависимости от количества запросов в системе аналогично представленному поведению на рис. 2.3, в то время как модель массового обслуживания системы с переменным потоком поступления аналогична представлению на рис. 2.4.

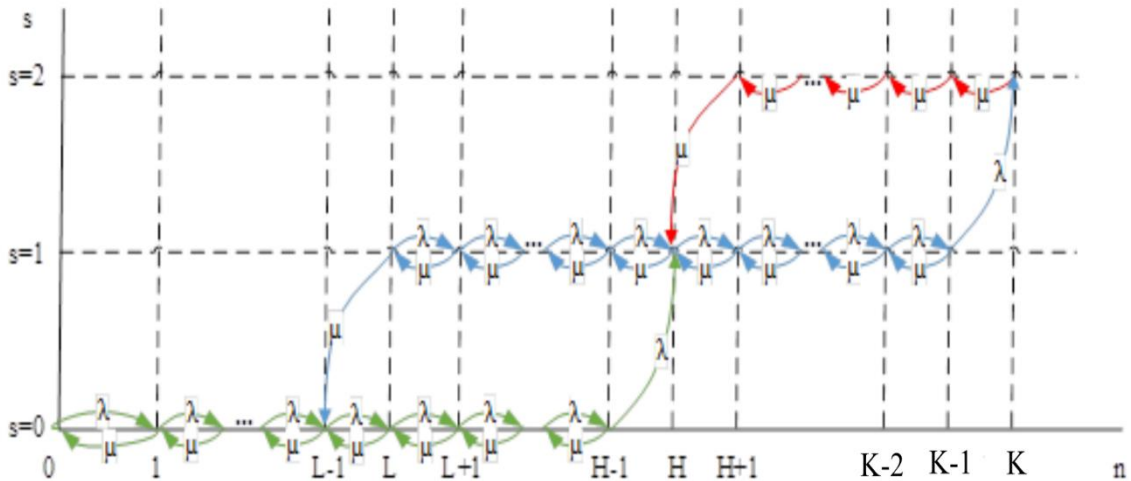


Рис. 2.5. Диаграмма переходов состояний системы с пороговым управлением

СУР для построенной пороговой модели управления может быть представлена в следующем виде

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu u(k))p_{0,k} &= \lambda u(k)p_{0,k-1} + \mu p_{0,k+1}, \quad k = 0, \dots, H - 2, k \neq L1, \\ (\lambda + \mu)p_{0,L-1} &= \lambda p_{0,L-2} = \mu p_{0,L} + \mu p_{0,L}, \\ (\lambda + \mu)p_{0,H-1} &= \lambda p_{0,H-2}, \\ (\lambda^* + \mu)p_{1,L} &= \mu p_{1,L+1}, \\ (\lambda^* + \mu)p_{1,k} &= \lambda^* p_{1,k-1}, \quad k = L + 1, \dots, K - 2, k \neq H, \\ (\lambda^* + \mu)p_{1,K-1} &= \lambda^* p_{1,K-2}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$(\lambda^* + \mu)p_{1,H} = \lambda^*p_{1,H-1} + \mu p_{1,H+1} + \lambda p_{0,H-1} + \mu p_{2,H+1},$$

$$p_{2,k} = p_{2,k+1}, k = H + 1, \dots, K - 1,$$

$$\mu p_{2,B} = \lambda^* p_{1,K-1},$$

где  $u(k) = \begin{cases} 1, & k > 0, \\ 0, & k \leq 0. \end{cases}$  – функция Хевисайда.

Решив эту систему, мы можем получить стационарные вероятности.

**Утверждение 2.** Стационарное распределение вероятностей системы  $M|M|1|(L, H)|K$  имеет вид

$$p_{0,k} = \rho^k p_{0,0}, k = 1, \dots, L - 1, \quad (2.8)$$

$$p_{0,k} = \frac{\rho^k (1 - \rho^{H-k})}{1 - \rho^{H-L+1}} p_{0,0}, k = L, \dots, H - 1, \quad (2.9)$$

$$p_{1,k} = \frac{\rho^H (1 - \rho)(1 - \rho'^{k-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1})(1 - \rho')} p_{0,0}, k = L, \dots, H, \quad (2.10)$$

$$p_{1,H+k} = \left( a_k - b_k \frac{(\rho' + 1)a_{K-H-1} - \rho' a_{K-H-2}}{(\rho' + 1)b_{K-H-1} - \rho' b_{K-H-2}} \right) p_{0,0}, k = 1, \dots, K - H - 1, \quad (2.11)$$

$$p_{2,k} = \rho' \left( a_{K-H-1} - b_{K-H-1} \frac{(\rho' + 1)a_{K-H-1} - \rho' a_{K-H-2}}{(\rho' + 1)b_{K-H-1} - \rho' b_{K-H-2}} \right) p_{0,0}, k = H + 1, \dots, K, \quad (2.12)$$

где  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}, \rho^* = \frac{\lambda^*}{\mu}$  и

$$a_0 = \frac{\rho^H (1 - \rho)(1 - \rho'^{H-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1})(1 - \rho')}, \quad (2.13)$$

$$a_1 = \left( \frac{1 - \rho'^{H-L+2}}{1 - \rho'^{H-L+1}} + \frac{\rho'(1 - \rho')(1 - \rho^{H-L})}{(1 - \rho'^{H-L+1})(1 - \rho)} \right) \cdot \frac{\rho^H (1 - \rho)(1 - \rho'^{H-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1})(1 - \rho')} - \rho' \rho^{H-1}, \quad (2.14)$$

$$a_k = (\rho' + 1)a_{k-1} - \rho' a_{k-2}, k = 2, \dots, K - H - 1, \quad (2.15)$$

$$b_0 = 0, b_1 = 1, b_k = (\rho' + 1)b_{k-1} - \rho' b_{k-2}, k = 2, \dots, K - H - 1. \quad (2.16)$$

**Доказательство.**

Перепишем первое уравнение (2.7) в виде

$$p_{0,k+1} = \mu^{-1}[(\lambda + \mu)p_{0,k} - \lambda p_{0,k-1}], k = 0, \dots, L - 2. \quad (2.17)$$

Далее, выражая последовательно из уравнения (2.7)  $p_{0,k+1}, k = 0, \dots, L - 2$  через  $p_{0,0}$  и применяя метод математической индукции, получаем соотношение

$$p_{0,k} = \rho^k p_{0,0}, k = 1, \dots, L - 1. \quad (2.18)$$

Подставляя (2.17) в (2.7) также получаем

$$p_{0,L} = \rho^L p_{0,0} - p_{1,L}. \quad (2.19)$$

Из уравнения (2.7) выпишем выражения для  $k = L$  и  $k = L + 1$

$$p_{0,L+1} = \rho^{L+1} p_{0,0} - (\rho + 1)p_{1,L},$$

$$p_{0,L+2} = \rho^{L+2} p_{0,0} - (\rho^2 + \rho + 1)p_{1,L}.$$

Теперь мы можем записать следующее соотношение

$$\begin{aligned} p_{0,k} &= \rho^k p_{0,0} - p_{1,L}(\rho^{k-L} + \rho^{k-1-L} + \dots + 1) = \\ &= \rho^k p_{0,0} - p_{1,L} \frac{1 - \rho^{k-L+1}}{1 - \rho}, k = L + 1, \dots, H - 1. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Обратим внимание, что выражение (2.19) является частным случаем выражения (2.20), следовательно, эти два соотношения можно записать в виде

$$p_{0,k} = \rho^k p_{0,0} - p_{1,L} \frac{1 - \rho^{k-L+1}}{1 - \rho}, k = L, \dots, H - 1. \quad (2.21)$$

Далее, мы находим взаимосвязь между  $p_{1,L}$  и  $p_{0,0}$ , подставляя выражения для  $p_{0,H-1}$  и  $p_{0,H-2}$  из уравнений (2.21) в соответствующее уравнение из (2.7)

$$p_{1,L} = p_{0,0} \frac{\rho^H(1-\rho)}{1-\rho^{H-L+1}}. \quad (2.22)$$

Подставляя выражение (2.22) в (2.21), находим зависимость  $p_{0,k}, k = L, \dots, H - 1$  в терминах  $p_{0,0}$

$$p_{0,k} = p_{0,0} \frac{\rho^k(1 - \rho^{H-k})}{1 - \rho^{H-L+1}}, k = L + 1, \dots, H - 1. \quad (2.23)$$

Запишем теперь уравнение для  $p_{1,L+1}$  из (2.7) в виде

$$p_{1,L+1} = (\rho' + 1)p_{1,L}. \quad (2.24)$$

Таким же образом, как и для соотношения (2.21), принимая во внимание (2.24) из уравнений (2.7) для  $k = L + 1, \dots, H - 1$ , получаем следующее выражение

$$p_{1,k} = p_{1,L} \frac{1 - \rho'^{k-L+1}}{1 - \rho'}, k = L + 2, \dots, H. \quad (2.25)$$

Заметим, что для  $K = L + 1$  результирующее выражение (2.25) дает формулу (2.24), следовательно, принимая во внимание (2.22), обе формулы могут быть заданы одним соотношением

$$p_{1,k} = \frac{\rho^H (1 - \rho) (1 - \rho'^{k-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1}) (1 - \rho')} p_{0,0}, k = L + 1, \dots, H. \quad (2.26)$$

Положим  $a_0 = \frac{\rho^H (1 - \rho) (1 - \rho'^{H-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1}) (1 - \rho')}$  коэффициент при  $p_{0,0}$  для  $p_{1,H}$  в формуле (2.26).

Принимая во внимание соотношение (2.23) и (2.26), получаем выражение для  $p_{1,H+1}$  из уравнения (2.7)

$$p_{1,H+1} = a_1 p_{0,0} - b_1 p_{2,H+1}, \quad (2.27)$$

$$\text{где } a_1 = \left( \frac{1 - \rho'^{H+2}}{1 - \rho'^{H+1}} + \frac{\rho' (1 - \rho') (1 - \rho^{H-L})}{(1 - \rho'^{H-L+1}) (1 - \rho)} \right) \frac{\rho^H (1 - \rho) (1 - \rho'^{H-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1}) (1 - \rho')} - \rho' \rho^{H-1}, b_1 = 1.$$

Из уравнения (2.7) для  $k = H + 1$ , мы получаем формулу для  $p_{1,H+2}$

$$p_{1,H+2} = p_{0,0} [(\rho' + 1) a_1 - \rho' a_0] - b_1 (\rho' + 1) p_{2,H+1}. \quad (2.28)$$

$$\text{Положим } a_2 = (\rho' + 1) a_1 - \rho' a_0, b_2 = b_1 (\rho' + 1) - \rho' b_0, b_0 = 0.$$

Продолжая выписывать соотношения таким образом, мы получаем формулу, которая может быть доказана методом индукции

$$p_{1,H+k} = a_k p_{0,0} - b_k p_{2,H+1}, k = 1, \dots, K - H - 1, \quad (2.29)$$

где выражения для  $a_k$  и  $b_k$  задаются формулами (2.15) и (2.16).

Из последних двух уравнений получаем следующую формулу

$$p_{2,k} = \rho' p_{1,B-1}, k = H + 1, \dots, K. \quad (2.30)$$

Подставляя выражения для  $p_{1,B-1}$  и  $p_{1,B-2}$  из соотношения (2.29) в соответствующую строку уравнения (2.7), мы выражаем  $p_{2,H+1}$  через  $p_{0,0}$

$$p_{2,H+1} = p_{0,0} \frac{(\rho' + 1) a_{K-H-2} - \rho' a_{K-H-2}}{(\rho' + 1) b_{K-H-1} - \rho' b_{K-H-2}}. \quad (2.31)$$

Подставляя полученное выражение (2.31) в соотношения (2.29) и (2.30), получаем оставшиеся формулы (2.11) и (2.12).

**Утверждение доказано.**

Показателями производительности, рассматриваемыми в этом разделе для разработанной модели, являются среднее количество запросов в системе (2.38) и вероятность блокировки вновь поступившего запроса (2.39).

В этом сценарии была рассмотрена оценка производительности системы в различных режимах работы системы, другими рассматриваемыми показателями являются средняя длина очереди и вероятность состояния блокировки.

Средняя длина очереди рассчитывается по формуле

$$Q = \sum_{(s,n) \in \psi} np_{s,n}. \quad (2.32)$$

Вероятность блокировки рассчитывается по формуле

$$\pi = p \sum_{(s,n) \in \psi_1} p_{s,n} + \sum_{(s,n) \in \psi_2} p_{s,n}. \quad (2.33)$$

Среднее время ожидания  $w$  начала обслуживания может быть рассчитано по формуле Литтла

$$\lambda(1 - \pi)w = Q, \quad (2.34)$$

$$w = \frac{Q}{\lambda(1-\pi)}.$$

Вероятность того, что система работает в нормальном режиме имеет вид

$$B_0 = \sum_{n=0}^{H-1} p_{0,n}, \quad (2.35)$$

Вероятность того, что система работает в режиме пониженной нагрузки и некоторые данные будут потеряны, записывается как

$$B_1 = q \cdot \sum_{n=L}^{K-1} p_{1,n}, \quad (2.36)$$

где  $q = 1 - p = \frac{\lambda - \lambda^*}{\lambda}$ .

Вероятность того, что система перегружена и не принимает новые запросы определена формулой

$$B_2 = \sum_{n=H+1}^K p_{2,n}. \quad (2.37)$$

Средняя длина очереди рассчитывается как

$$Q = \sum_{n=0}^{H-1} p_{0,n} + q \cdot \sum_{n=L}^{K-1} p_{1,n} + \sum_{n=H+1}^K p_{2,n}. \quad (2.38)$$

И, наконец, вероятность потери пакета представляется в виде

$$P = B_1 + B_2. \quad (2.39)$$

Изучив стационарное распределение вероятностей состояний системы, в разделе 2.3 реализован численный анализ вероятностно-временных характеристик системы.

### 2.3 Численный анализ вероятностно-временных характеристик

Было проведено численное сравнение вероятностей сброса пакетов для обоих рассматриваемых алгоритмов в зависимости от параметров  $K, L, H, p$  и  $\rho = \lambda/\mu$  при значениях исходных данных из [33]. В результате анализа показано, что алгоритм гистерезисного управления более эффективен, чем алгоритм IRED при высоких значениях нагрузки. Данные для анализа представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Исходные данные

Параметр	Значение
$\rho$	0, ..., 2
L	20
H	80
K	99

На представленных ниже графиках показана визуализация различных показателей производительности, рассчитанных в ходе численного анализа. На рис. 2.6 показан сравнительный анализ с точки зрения среднего числа пакетов в системе между моделью IRED и разработанной в диссертационной работе моделью гистерезисного управления. Из графиков видно, что изначально в обеих моделях

обслуживается одинаковое количество пакетов. Однако при нагрузке системы от 0,9 до 1,25 модель гистерезисного управления не превосходит модель IRED с точки зрения числа пакетов, но при нагрузке выше 1,25 модель гистерезиса поддерживает меньшее число пакетов в системе, что приводит к лучшей и эффективной работе сервиса. Таким образом, мы можем сделать вывод, что модель гистерезисного управления демонстрирует лучшую эффективность в условиях перегрузок и пиковых нагрузок.

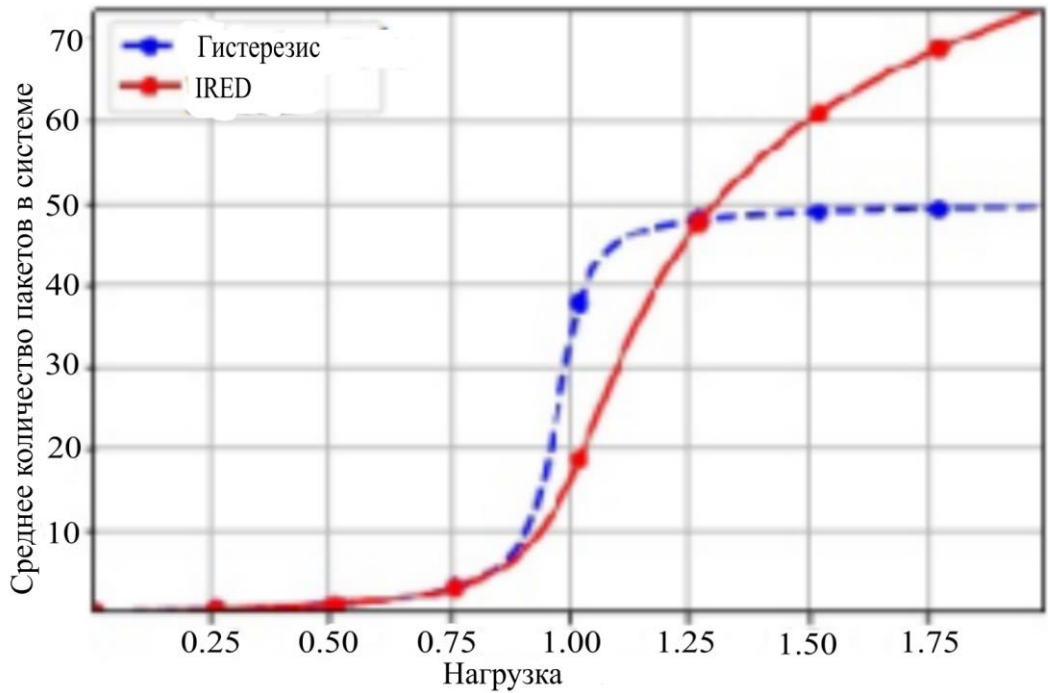


Рис. 2.6. Среднее количество пакетов в системе

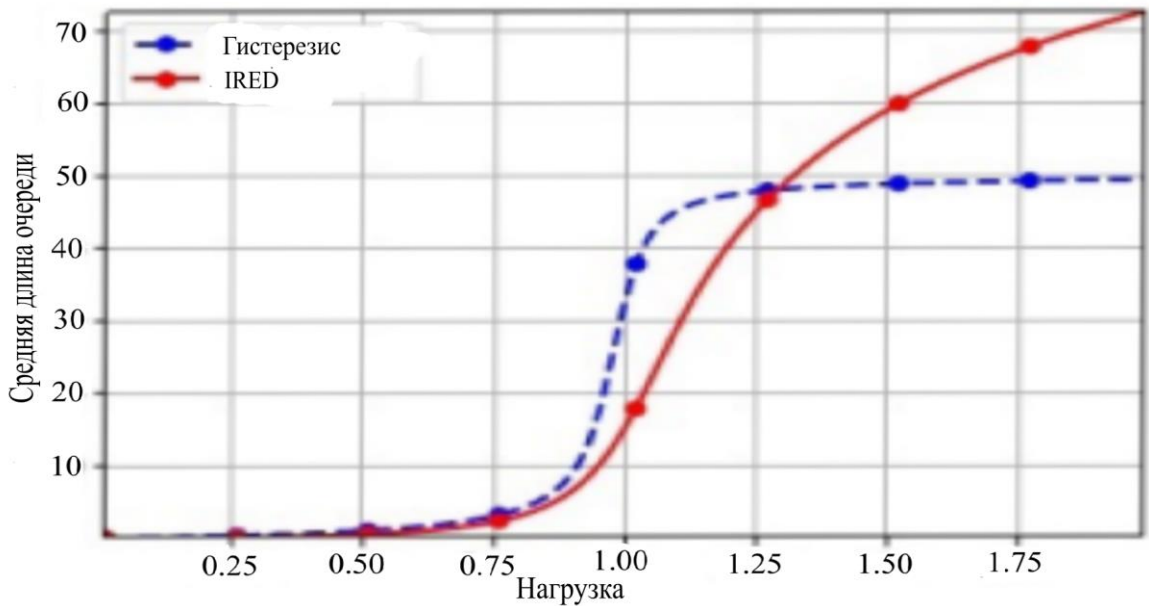




Рис. 2.7. Средняя длина очереди

На рис. 2.7 показано среднее количество пакетов в очереди. Визуализация демонстрирует аналогичную схему и поведение, как и на рис.2.6.

Чтобы представить поведение двух систем с точки зрения вероятности блокировки, мы представили визуализацию результатов механизмов управления в детализированном виде с помощью логарифмической шкалы, как показано на рис. 2.8. Из графиков видно, что разработанная в диссертационной работе гистерезисная модель зафиксировала несколько меньшее количество заблокированных пакетов, что дает ей преимущество перед моделью IRED при низких нагрузках на систему.

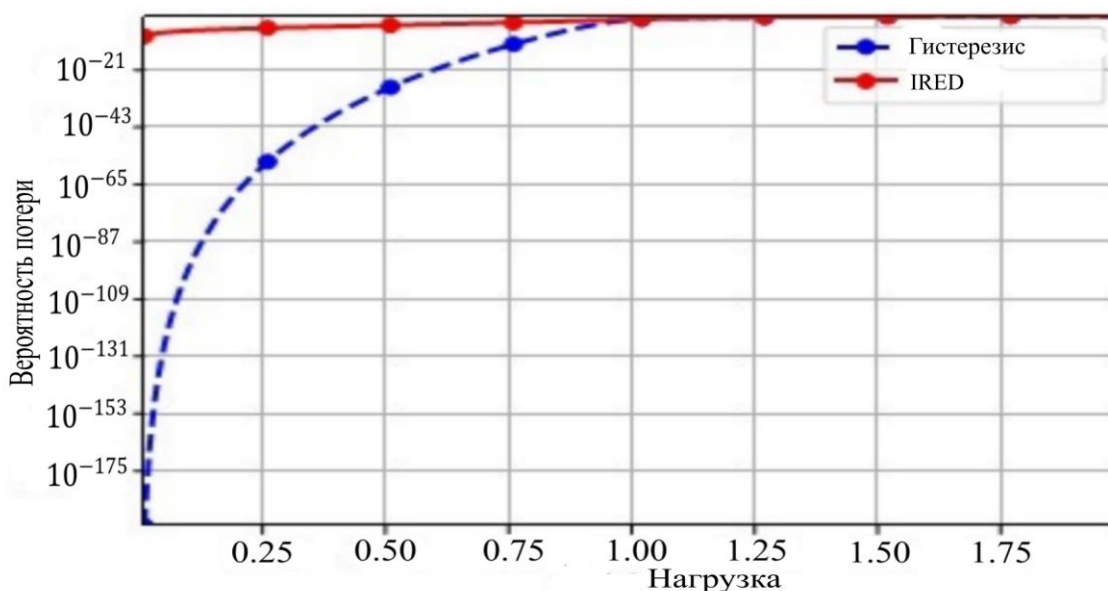


Рис. 2.8. Вероятность блокировки в логарифмической шкале

На рис. 2.9. показаны одни и те же характеристики, сравниваемые между двумя методами контроля перегрузок с точки зрения нижнего порога  $L$ . На рис. 2.9а. показана вероятность блокировки вновь поступающего запроса. На рис. 2.9б. показано среднее количество запросов в очереди. Можно заметить, что вероятность блокировки для гистерезисного алгоритма изначально ниже, чем для алгоритма IRED. Однако с ростом порога  $L$  вероятность увеличивается намного быстрее, хотя средняя длина очереди выше для гистерезисного управления для всех рассмотренных пороговых значений. Анализ показывает, что нахождение оптимального порогового значения может в значительной степени повысить

производительность системы. Например, при пороге  $L = 8$  обе модели имеют одинаковую вероятность блокировки, даже несмотря на то, что гистерезисное управление удерживает в очереди большее число пакетов.

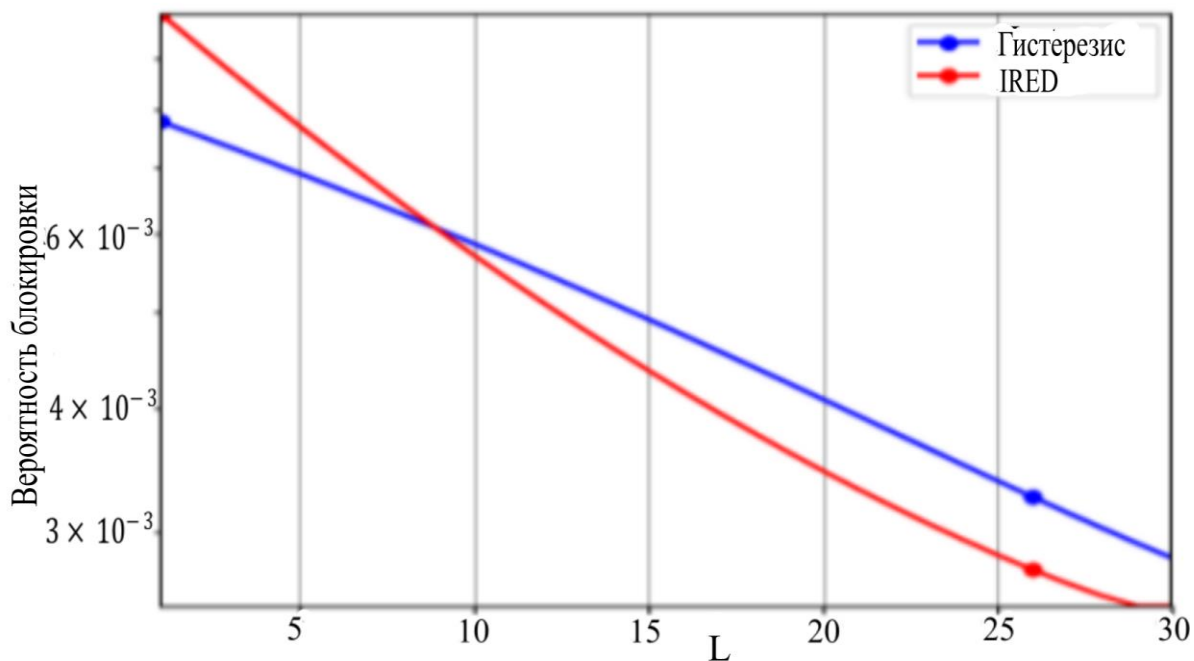


Рис. 2.9а. Вероятность блокировки пакета

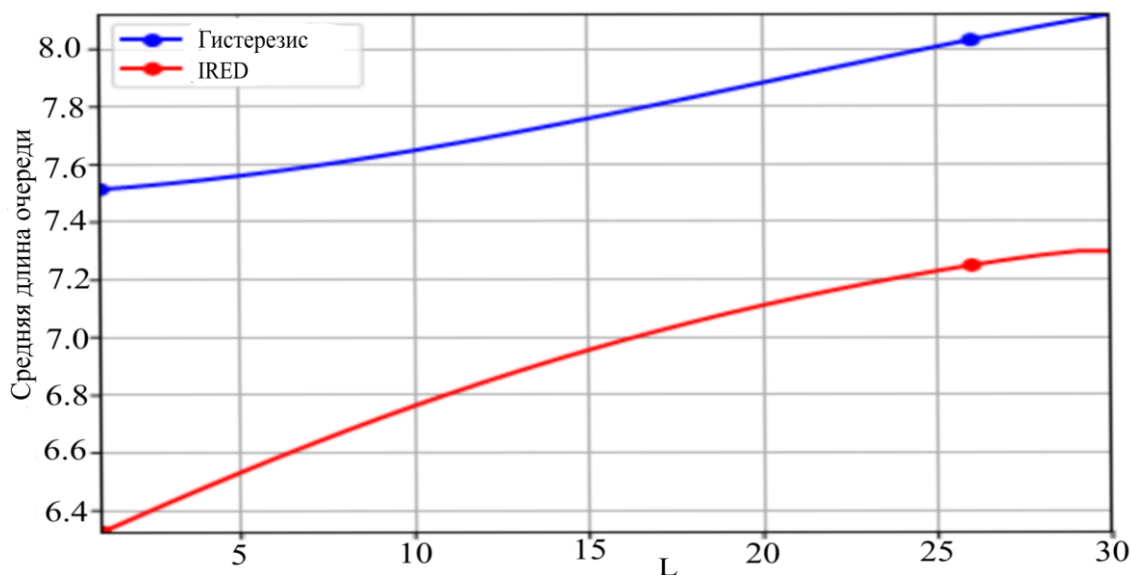


Рис. 2.9б. Средняя длина очереди

В рассмотренном сценарии модели облачной системы WSN для обнаружения вторжений можно заключить, что в условиях перегрузок системы модель порогового управления нагрузок превосходит механизм управления IRED.

С точки зрения средней длины очереди алгоритм гистерезисного управления уступает алгоритму IRED. Эти результаты представлены на рис. 2.10 при фиксированном значении объема буферной памяти  $K = 50$  и нижнем пороге  $L = 10$  и изменении остальных параметров в пределах  $0.1 \leq p < 1$  и  $12 \leq H \leq 40$ . На графике показано минимальное пороговое значение нагрузки  $\rho_0$ , после которого гистерезисный подход позволяет успешно передавать больше пакетов, чем алгоритм IRED, т.е.  $\rho_0: \forall \rho > \rho_0 K_{hyst}(\rho) < K_{IRED}(\rho)$ . Из рис. 2.10, можно сделать вывод, что пороговое значение нагрузки  $\rho_0$  почти линейно зависит от доли  $p$  сброшенной нагрузки в состоянии пониженной нагрузки и слабо зависит от изменения верхнего порога при фиксированном нижнем пороге. Аналогичная картина наблюдается и с другими значениями нижнего порога.

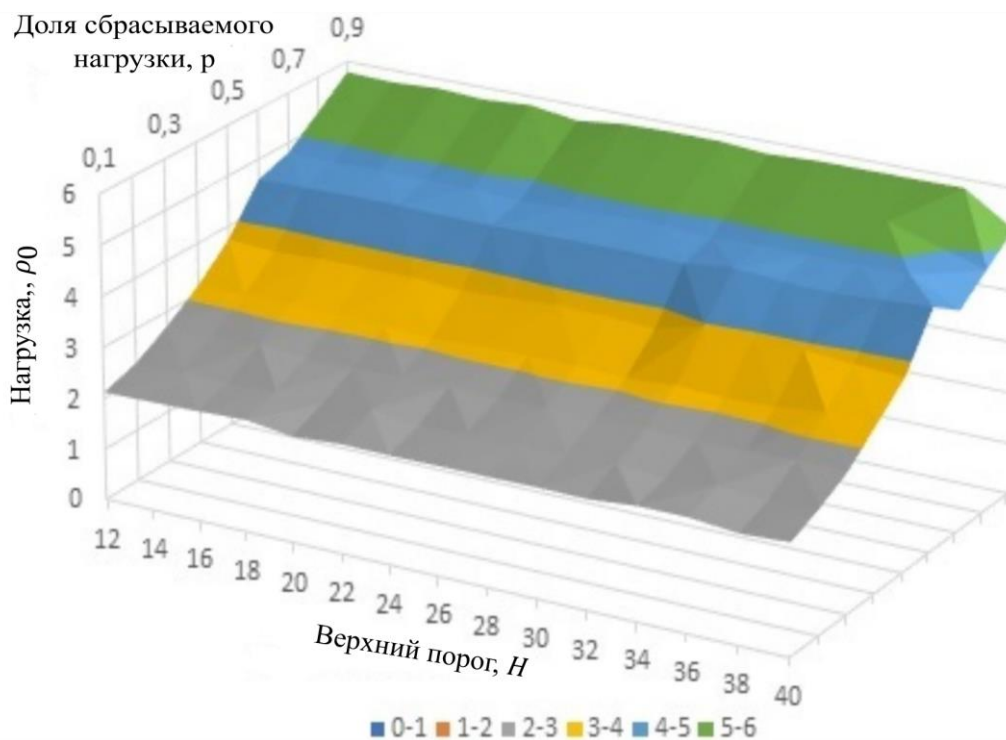


Рис. 2.10. Пороговое значение нагрузки, при превышении которого гистерезисное управление показывает лучшие результаты по сравнению с алгоритмом IRED по вероятности сброса пакета

На рисунке 2.11 отдельно представлены результаты сравнения производительности системы с гистерезисным управлением и управлением с использованием алгоритма IRED для объема буферной памяти  $K = 40$ , доли

сброшенных пакетов  $p = 0.3$ , нижнего и верхнего порогов  $L = 10$  и  $H = 30$  соответственно.

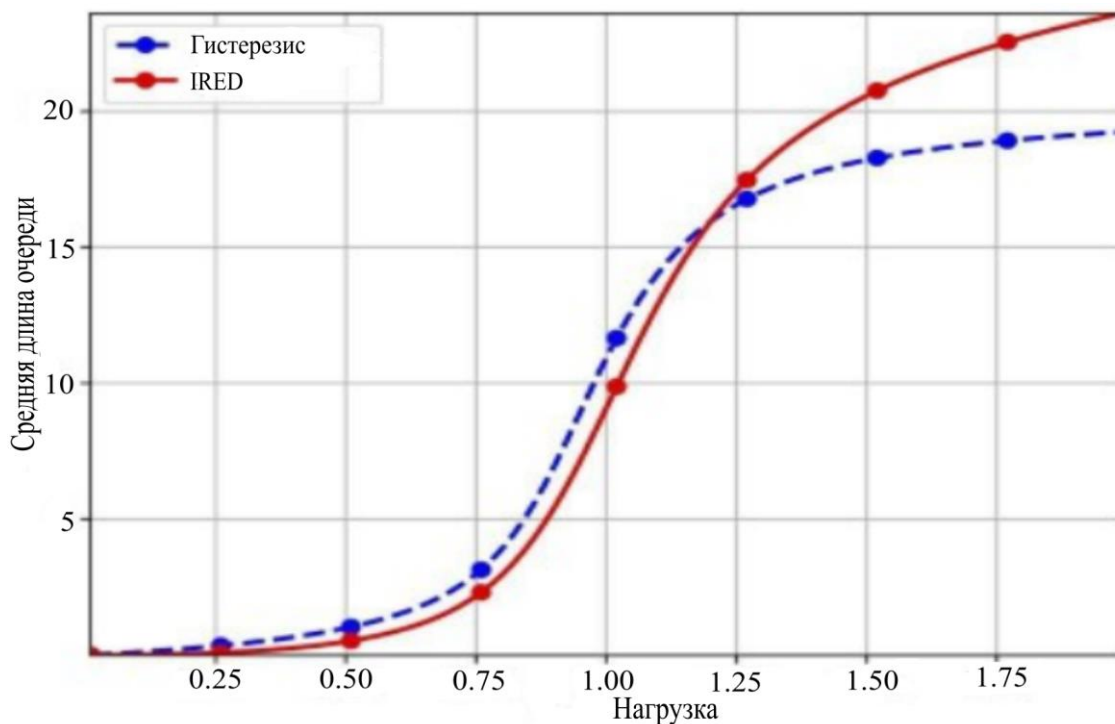


Рис. 2.11а. Средняя длина очереди.

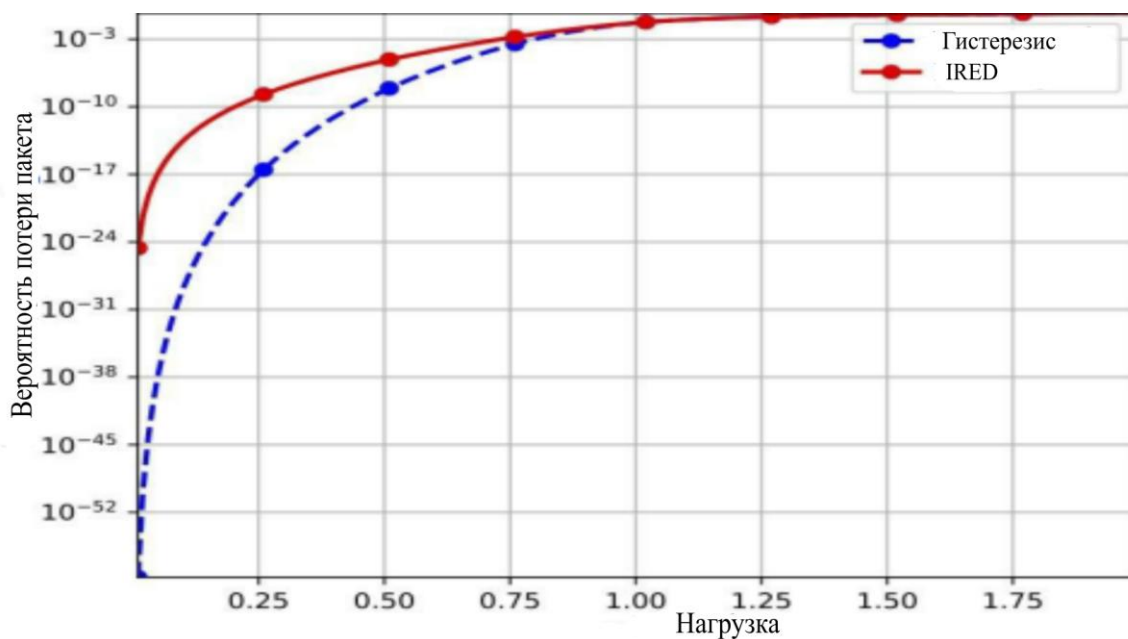


Рис. 2.11б. Вероятность сброса пакета.

Средняя длина очереди в зависимости от предполагаемой нагрузки, изменяющаяся в пределах  $0 < \rho \leq 2$ , показана на рис. 2.11а. На рис. 2.11б логарифмическая шкала показывает вероятность сброса пакетов в зависимости от предложенной нагрузки.

Из приведенных выше результатов видно, что пороговое значение нагрузки также существенно зависит от объема очереди, поскольку в этом случае алгоритм IRED показывает лучшие результаты при низкой нагрузке, а также при небольшой перегрузке  $\rho \leq 1.2$ . Однако, начиная со значения нагрузки  $\rho > 1.2$ , гистерезисное управление демонстрирует наилучшие характеристики. Таким образом, в проведенном эксперименте пороговое значение нагрузки снизилось по сравнению с предыдущим экспериментом до значения  $\rho_0 = 1,2$  при тех же значениях порогов и доле сбрасываемой нагрузки. Это показывает, что пороговое значение обратно пропорционально размеру очереди.

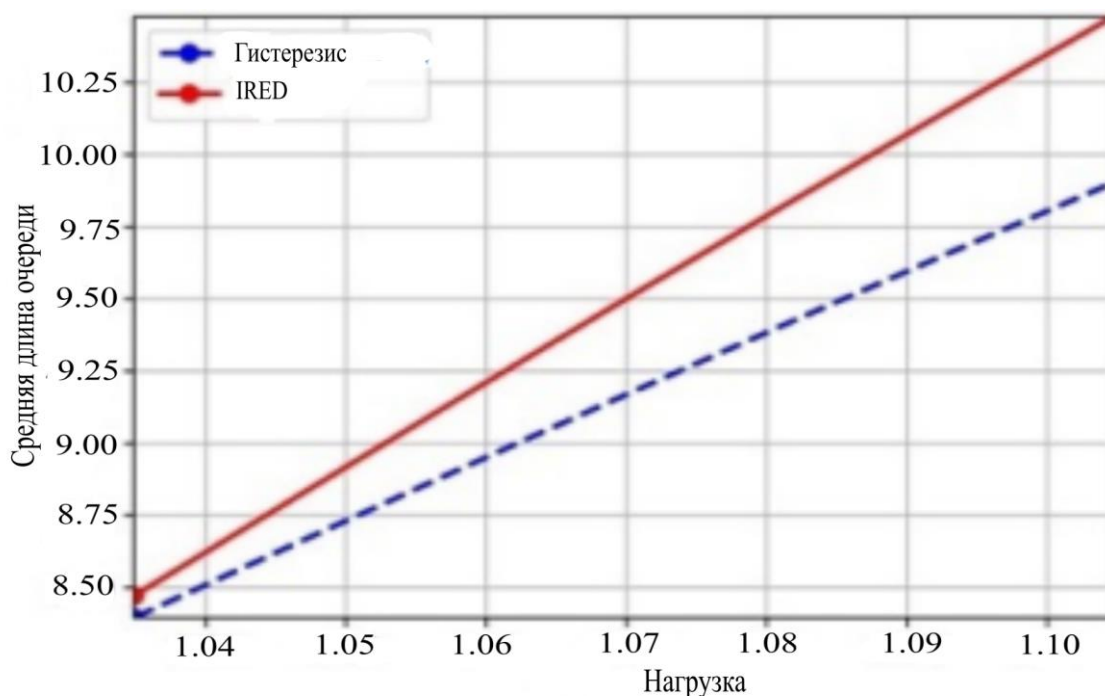


Рис. 2.12. Средняя длина очереди в зависимости от размера окна управления

На рисунке 2.12 показано сравнение систем в зависимости от размера окна управления  $(H - L)$  с фиксированным верхним порогом  $H = 35$ , объемом буферной памяти  $K = 40$ , вероятностью сброса пакета  $p = 0,3$  и изменением нижнего порога  $L$  со значения 5 до значения 35.

Из графиков видно, что, хотя пороговое значение загрузки довольно слабо зависит от значения нижнего порога, пороговое значение сильно влияет на среднюю длину очереди.

Численный эксперимент показал, что наиболее значимыми параметрами, влияющими на пороговое значение нагрузки, при превышении которого гистерезисный подход дает лучшие результаты по сравнению с алгоритмом IRED, с точки зрения вероятности сброса, являются объем очереди и доля снижаемой нагрузки. Также было показано, что эти два параметра являются наиболее значимыми для фиксированного порогового значения нагрузки.

Кроме того, для типичного набора исходных данных исследовано зависимость показателей качества функционирования системы от размера окна управления. Показано, что для рассматриваемого набора данных с размером окна  $H - L \leq 3$  управление гистерезисом дает лучшие результаты, чем IRED, во всех случаях, когда  $\rho > 1$ , т.е. когда система перегружена. При  $\rho = 0,8$  в IRED длина очереди меньше, но разница в значениях, полученных для обоих алгоритмов, невелика, и поведение системы гистерезиса объясняется ее недогрузкой. Таким образом, размер окна управления, хотя и в меньшей степени, также влияет на пороговое значение нагрузки.

Исследование в этой главе показали, что модель порогового управления в области нагрузочных параметров, соответствующих перегрузкам шлюза WSN, является более эффективной по сравнению с алгоритмом IRED.

## **ГЛАВА 3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА В СОСТОЯНИЯХ ПЕРЕГРУЗКИ**

### **3.1 Марковская модель многопорогового управления нагрузкой**

В настоящее время, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) применяются для самых разных сценариев. Одним из важных из них является автоматический сбор сенсорных данных. В этой работе мы изучаем использование беспилотных летательных аппаратов для безопасного удаленного мониторинга сети, включенной через широкополосную сеть большой дальности действия (англ. Long Range Wide Area Network, LoRaWAN), маломощную сеть широкой области действия (англ. Low-Power Wide Area Network, LPWAN). В рассматриваемом сценарии использования беспилотные летательные аппараты несут датчики, собирающие данные, и модули LoRa для передачи собранных данных на стационарный шлюз. Исследования в данной главе сосредоточены на контроле перегрузки на шлюзе беспроводной сети. В частности, мы предлагаем механизм, основанный на много-пороговом управлении, чтобы уменьшить перегрузку системы, отбросив часть данных, отправляемых датчиками. Рассматриваемая система моделируется с использованием системы массового обслуживания с несколькими порогами. В исследовании изучались зависящие от времени характеристики системы, в том числе, среднее время, которое система проводит в состояниях перегрузки и пониженной нагрузки. Наши результаты демонстрируют, что использование гистерезисного управления позволяет системе принимать приоритетный трафик данных даже при относительно высокой нагрузке на систему.

С растущим развитием IoT и M2M коммуникаций, WSN привлекают большое внимание благодаря своим преимуществам с точки зрения стоимости и гибкости. Из-за их популярности возникают новые проблемы с точки зрения пропускной способности сетей из-за больших объемов трафика данных, генерируемого этими устройствами [52], [53]. Эта проблема особенно актуальна для задач удаленного мониторинга безопасности в отдаленных районах, поскольку

объем генерируемых данных огромен, и сеть может страдать от проблем с покрытием и низкими инвестициями в инфраструктуру [54].

Еще одна проблема заключается в энергоснабжении беспилотных летательных аппаратов и других устройств Интернета вещей, поскольку система развернута в отдаленных районах. На этом фоне решения, основанные на возобновляемых источниках энергии [55], в виде солнечных панелей могут быть использованы для обеспечения постоянной доступности энергии для беспилотных летательных аппаратов и устройств Интернета вещей с помощью блока питания, работающего на солнечной энергии.

БПЛА в настоящее время находят применение во многих прикладных областях, включая телекоммуникации. В частности, они могут быть использованы в качестве воздушных базовых станций [56], [73], части инфраструктуры интегрированного доступа и обратной транспортировки, служащих узлами ретрансляции [57], [58]. В контексте систем Интернета вещей сообщалось об использовании беспилотных летательных аппаратов в контексте ретрансляции в [59] и сбора и доставки данных в [60].

Проблема недостаточной инфраструктуры и охвата может быть частично смягчена путем внедрения предварительно запрограммированных или дистанционно управляемых БПЛА. Беспилотные летательные аппараты, благодаря своей мобильности и гибкости, могут менять свое местоположение между сбором данных и передачей их на шлюз, таким образом, собирая данные в зонах с низким покрытием и передавая их, когда они достигают зоны с надежным покрытием [60]. Другим возможным решением было бы размещение шлюза или ретрансляторов на мобильных беспилотных летательных аппаратах [61], создавая таким образом временные каналы в районы с низким охватом и собирая данные с датчиков по заранее определенному маршруту патрулирования.

В настоящее время проводится много исследований БПЛА с сетями связи LoRa из-за доступности этой технологии, а также ее большой дальности передачи более 15 км, в то время как сеть LoRa на основе БПЛА в реальном времени обычно подразделяется на два типа: БПЛА как Узел LoRa или шлюз LoRa [62].



Беспилотный летательный аппарат в качестве узла LoRa несет датчики с модулем LoRa, которые действуют как мобильный датчик, собирают данные и передают их шлюзу после перемещения в зону его действия. Шлюз LoRa на базе беспилотного летательного аппарата может использоваться в качестве временного шлюза в зонах с низким покрытием стационарной сети или собирать данные со стационарных датчиков, развернутых на маршруте его патрулирования.

Исследование здесь сосредоточено на проблеме контроля перегрузки в системе удаленного мониторинга безопасности WSN на базе беспилотных летательных аппаратов с технологией LoRaWAN. В рассматриваемой системе датчики размещены на беспилотных летательных аппаратах, которые собирают видеоданные о потенциальном проникновении и отправляют их на шлюз. Поскольку LoRa имеет высокий уровень покрытия, один шлюз может охватывать более 15 квадратных километров. Предполагая, что в этой области находится большое количество беспилотных летательных аппаратов с датчиками, шлюз может испытывать перегрузки. С этой целью мы предлагаем механизм гистерезисного управления чтобы уменьшить возможные перегрузки, испытываемые шлюзом в случаях высокой интенсивности трафика от датчиков. В этой исследовательской работе мы изучили среднее время, которое система проводит в состояниях пониженной нагрузки на трафик, когда алгоритм отбрасывает некоторые из менее релевантных сообщений данных, и в состоянии перегрузки, когда релевантные данные могут быть потеряны.

Рассмотрим сценарий проникновения на территорию фермы, при котором на фермерском поле разворачивается система безопасности, чтобы включить сигнализацию в случае вторжения стада крупного рогатого скота. Система безопасности состоит из нескольких видео датчиков, установленных на БПЛА, патрулирующих поля по заданному маршруту. Обследованная область может быть разделена на две разные области: желтую и красную. Желтая область — это область предупреждения, которая показывает, приближается ли объект к полю, но еще не вторгается на его территорию. Красная область показывает фактическое проникновение на поля. первая область необходима для того, чтобы установить

предупреждение для потенциальных нарушителей, в то время как вторая область отвечает за включение сигнализации в связи с нарушением границ. Датчики установлены на нескольких беспилотных летательных аппаратах, патрулирующих заданную зону нескольких фермерских полей, как показано на рис.3.1. Шлюз, который получает данные со всех датчиков, может испытывать значительную нагрузку в случаях массового проникновения на территорию из-за количества подключенных датчиков. Таким образом, мы предлагаем внедрить в него механизм управления гистерезисом, чтобы облегчить его нагрузку.

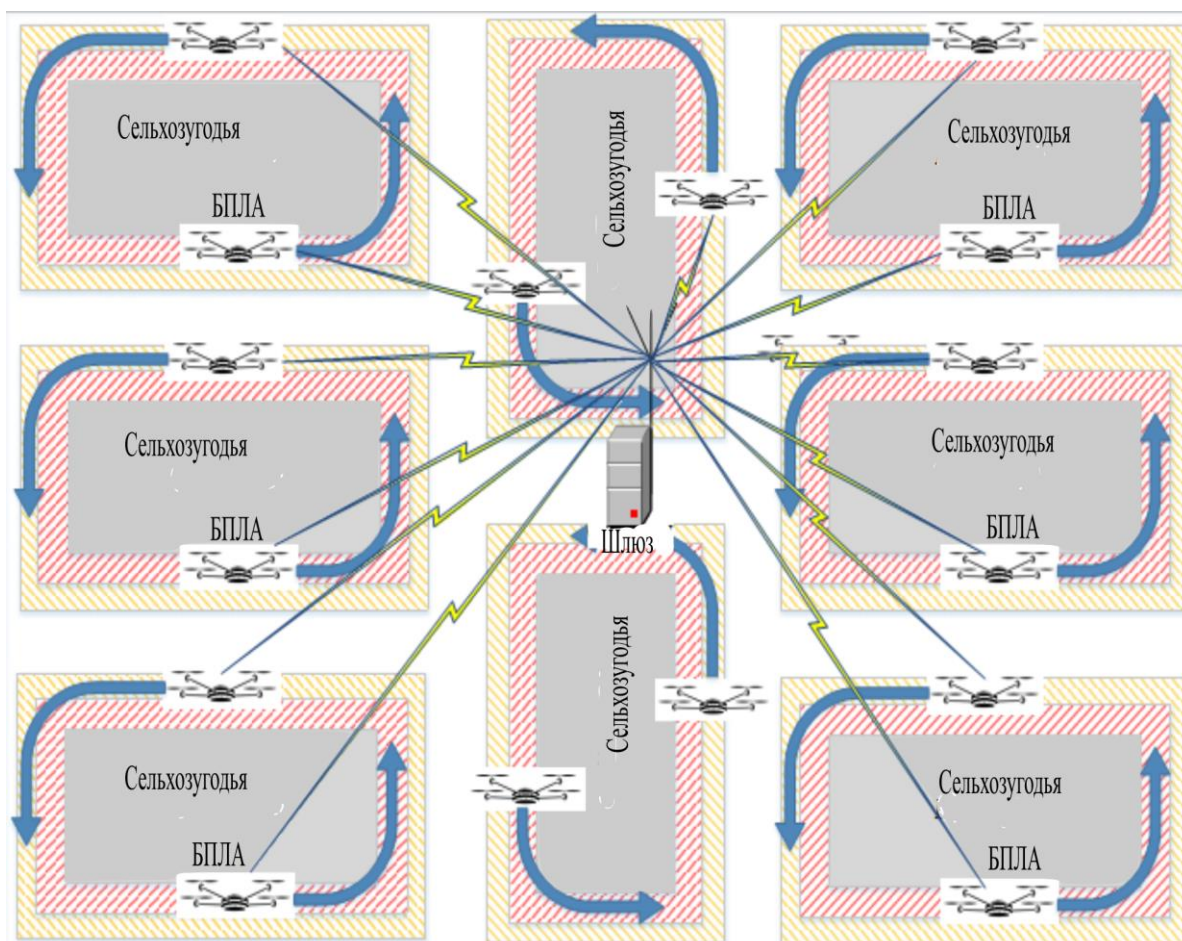


Рис. 3.1. Сценарий вторжения на ферму

Мы рассматриваем модель СМО с одним сервером с экспоненциальной интенсивностью обслуживания  $\mu$  и буфером размера  $K$ . Сообщения занимают буфер с момента их поступления в систему до момента их выхода из нее. Входящие потоки из желтой и красной областей моделируются как независимые пуассоновские потоки с параметрами  $\lambda_1(t)$  и  $\lambda_2(t)$  соответственно. Скорости поступления зависят от времени из-за алгоритма гистерезиса, используемого для

фильтрации входных потоков в случаях высокой загрузки системы. Система изображена на рис.3.2.

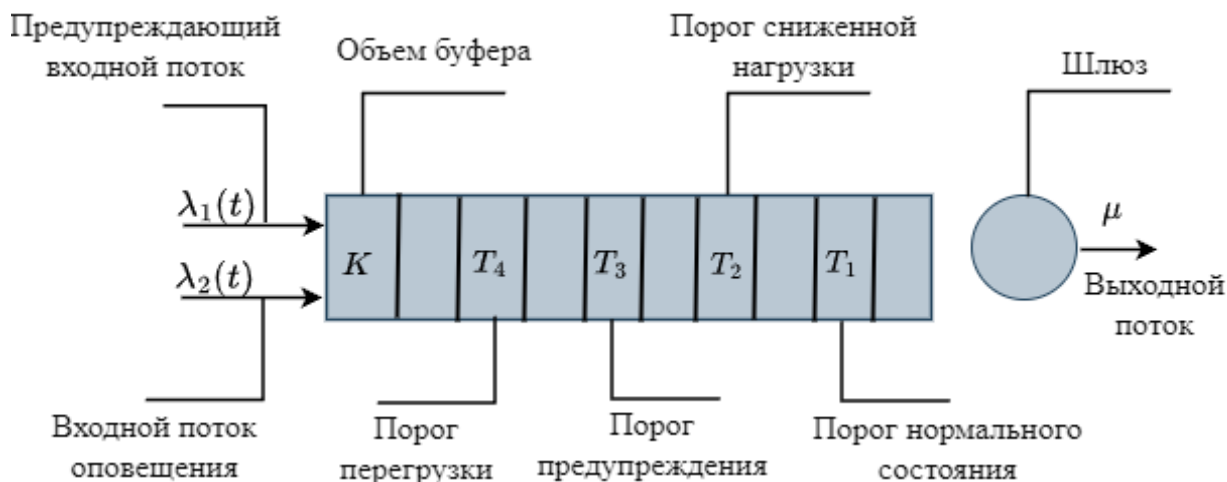


Рис. 3.2. Модель системы WSN с несколькими порогами

Механизм управления гистерезисом с четырьмя порогами: порог нормального состояния  $T_1$ , порог пониженной нагрузки  $T_2$ , порог предупреждения  $T_3$  и порог перегрузки  $T_4$  используются для фильтрации нагрузки системы. Таким образом, система может находиться в любом из пяти состояний: нормальное состояние  $\mathcal{X}_0 (s = 0)$  состояние пониженной нагрузки  $\mathcal{X}_1 (s = 1)$ , состояние тревоги  $\mathcal{X}_2 (s = 2)$ , состояние перегрузки  $\mathcal{X}_3 (s = 3)$  и состояние блокировки  $B (s = 4)$ , в зависимости от общего числа сообщений в системе  $n$ . Пространство состояний (3.1) может быть записано следующим образом:

$$\mathcal{X} = \{(n, s): 0 \leq n \leq K, s \in \{0, 1, 2, 3, 4\}\}, \quad (3.1)$$

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cup \mathcal{X}_1 \cup \mathcal{X}_2 \cup \mathcal{X}_3 \cup B, \quad (3.2)$$

$$\mathcal{X}_s = \{(n, s): T_{s-1} \leq n < T_{s+1}, s \in \{0, 1, 2, 3\}\},$$

$$T_{-1} = 0, T_5 = B = \{(n, s): n_1 + n_2 = K, s = 4\}. \quad (3.3)$$

Загрузка системы в исходном нормальном состоянии  $\mathcal{X}_0$  равна  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ , однако, когда общее количество сообщений в системе достигает порогового значения  $T_2$ , система переходит в состояние пониженной нагрузки  $\mathcal{X}_1$  скорость поступления первого потока фильтруется как  $\lambda_1^* = p_1 \lambda_1$  с параметром  $0 \leq p_1 \leq 1$  в качестве вероятности принятия пакета первого типа. В течение этого периода второй поток не фильтруется, поскольку он содержит более важную информацию.

После того, как система вошла в состояние пониженной нагрузки  $\mathcal{X}_1$ , если общее количество сообщений в системе уменьшается до порогового значения  $T_1$ , интенсивность поступления первого потока возвращается к своему первоначальному значению, и система возвращается в нормальное состояние  $\mathcal{X}_0$ . Однако, если вместо этого количество сообщений в буфере продолжает расти и превышает пороговое значение  $T_3$ , то система перестает принимать трафик первого типа и принимает только данные второго потока, входящие в состояние предупреждения  $\mathcal{X}_2$ .

В случае, если система находится в состоянии тревоги  $\mathcal{X}_2$  и количество сообщений в системе падает до  $T_2$ , система возвращается в состояние пониженной нагрузки  $\mathcal{X}_1$  и снова начинает принимать уменьшенный поток  $\lambda_1^*$  первого типа, одновременно принимая полностью поток второго типа. В случае, если число в буфере все еще продолжает увеличиваться до уровня  $T_4$ , второй поток уменьшается таким же образом  $\lambda_2^* = p_2 \lambda_2$  с параметром  $0 \leq p_2 \leq 1$  как принятия пакета второго типа. В этом случае первый поток остается отклоненным, и система переходит в состояние перегрузки  $\mathcal{X}_3$ .

После того, как система вошла в состояние перегрузки  $\mathcal{X}_3$ , она может либо вернуться в состояние предупреждения  $\mathcal{X}_2$ , если количество сообщений в буфере уменьшится до  $T_3$ , либо перейти в состояние блокировки В, если буфер заполнится. В состоянии блокировки система отклоняет любые данные, поступающие с датчиков, поскольку у нее недостаточно емкости для их хранения. Как только сообщение обрабатывается на сервере и в буфере появляется пустое пространство для размещения нового сообщения, система возвращается в состояние перегрузки  $\mathcal{X}_3$ .

Представленное пространство состояний соответствует МП  $X(t) = \{(n(t), s(t))\}$ , который описывает поведение системы в момент времени  $t$ . Граф интенсивностей переходов для марковского процесса  $X(t)$  показан на рис. 3.3.

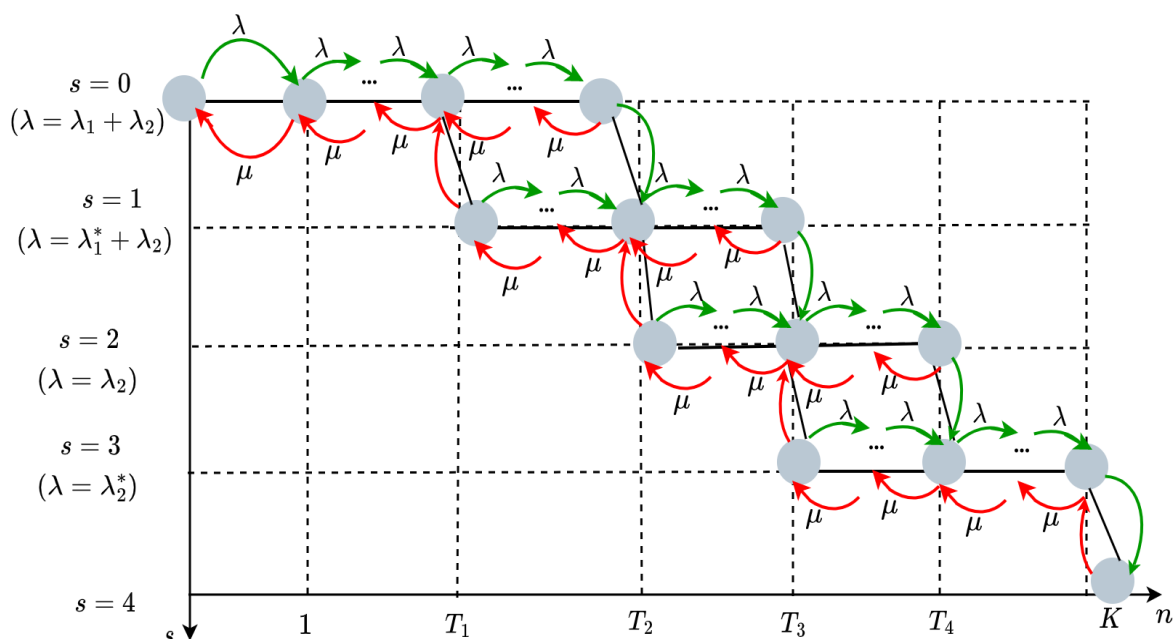


Рис. 3.3. Граф интенсивностей переходов МП  $X(t)$

Задача состоит в нахождении времени пребывания МП  $X(t)$  в состояниях множества  $\mathcal{X}$ , особенно в множествах  $\mathcal{X}_3$  и  $\mathcal{X}_4$ . В следующем разделе предложен метод расчета характеристик этой случайной величины.

### 3.2 Метод анализа вероятностно-временных характеристик

Здесь мы рассматриваем зависящие от времени характеристики системы, такие как среднее значение и дисперсия времени оповещения системы  $\tau_3$ , когда система отклоняет сообщения второго типа  $\tau_2$ , и среднее значение и дисперсия времени, которое система проводит в состоянии перегрузки, когда система отбрасывает часть сообщений оповещения с высоким приоритетом. Чтобы найти эти характеристики, мы вводим усеченные марковские процессы  $X^{(i)}(t), i \in \{2,3\}$  с пространствами состояний

$$\mathcal{X}^{(2)} = \mathcal{X}_2 \cup \mathcal{X}_3 \cup \{T_2, 1\} \cup \{K, 4\}, \quad (3.4)$$

$$\mathcal{X}^{(3)} = \mathcal{X}_3 \cup \{T_3, 2\} \cup \{K, 4\}, \quad (3.5)$$

абсолютными вероятностями МП  $X^{(i)}(t)$

$$p^{(i)}_{(n,s)}(t) = P\{X^{(i)}(t) = (n, s), (n, s) \in \mathcal{X}^{(i)}\}, i \in \{2,3\}, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{P}^{(i)}(t) := \left( p^{(i)}_{(n,s)}(t) \right)_{(n,s) \in \mathcal{X}^{(i)}}, i \in \{2,3\}, \quad (3.7)$$

и матрицей переходных вероятностей

$$(\mathbf{P}^{(i)})^T(t) = (\mathbf{P}^{(i)})^T(0) \mathbf{P}^{(i)}(t), i \in \{2,3\}. \quad (3.8)$$

Вектор абсолютных (мгновенных) вероятностей в момент времени  $t$  может быть через т.н. матричную экспоненту по формуле

$$\mathbf{P}^{(i)}(t) = \left( P^{(i)}_{(n,s),(m,r)}(t) \right)_{(n,s),(m,r) \in \mathcal{X}^{(i)}} = e^{\mathbf{A}^{(i)}t}, i \in \{2,3\}. \quad (3.9)$$

Здесь  $\mathbf{A}^{(i)}$  – инфинитезимальная матрица интенсивностей переходов для процесса  $X^{(i)}(t)$ , полученная аналогично [63].

Матрица интенсивностей переходов для МП  $X(t)$  может быть записана следующим образом:

$$\mathbf{A} = a_{(n_1,s_1),(n_2,s_2)} = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 + \lambda_2, (s_1 = s_2 = 0) \cap (n_2 = n_1 + 1) \cup \\ \cup (s_1 = 0) \cap (s_2 = 1) \cap (n_2 = n_1 + 1 = T_2), \\ p_1 * \lambda_1 + \lambda_2, (s_1 = s_2 = 1) \cap (n_2 = n_1 + 1) \cup \\ \cup (s_1 = 1) \cap (s_2 = 2) \cap (n_2 = n_1 + 1 = T_3), \\ \lambda_2, (s_1 = s_2 = 2) \cap (n_2 = n_1 + 1) \cup \\ \cup (s_1 = 2) \cap (s_2 = 3) \cap (n_2 = n_1 + 1 = T_4), \\ p_2 * \lambda_2, (s_1 = s_2 = 3) \cap (n_2 = n_1 + 1) \cup \\ \cup (s_1 = 3) \cap (s_2 = 4) \cap (n_2 = n_1 + 1 = K), \\ \mu, (s_1 = s_2) \cap (n_2 = n_1 - 1) \cup \\ \cup (s_2 = s_1 - 1 = s - 1) \cap (n_2 = n_1 - 1 = T_s - 1), s = 1, \dots, 5, \\ -\lambda_1 - \lambda_2 - \mu, (s_1 = s_2 = 0) \cap (n_1 = n_2 \neq 0), \\ -p_1 * \lambda_1 - \lambda_2 - \mu, (s_1 = s_2 = 1) \cap (n_1 = n_2 \neq 0), \\ -\lambda_2 - \mu, (s_1 = s_2 = 2) \cap (n_1 = n_2 \neq 0), \\ -p_2 * \lambda_2 - \mu, (s_1 = s_2 = 3) \cap (n_1 = n_2 \neq 0), \\ -\mu, (s_1 = s_2 = 4) \cap (n_1 = n_2), \\ -(\lambda_1 + \lambda_2), (s_1 = s_2 = 0) \cap (n_1 = n_2), \\ 0, otherwise. \end{array} \right.$$

Эта матрица может быть представлена в блочно-диагональном виде, как показано на рис. 3.4.

<b>A</b>	$\mathcal{X}_0$	$\mathcal{X}_1$	$\mathcal{X}_2$	$\mathcal{X}_3$	$\mathcal{X}_4$	$K$
$\mathcal{X}_0$	<b>D</b>	<b>U</b>	0	0	0	0
$\mathcal{X}_1$	<b>L</b>	<b>D</b>	<b>U</b>	0	0	0

$\mathcal{X}_2$	0	<b>L</b>	<b>D</b>	<b>U</b>		0
$\mathcal{X}_3$	0	0	<b>L</b>	<b>D</b>	<b>U</b>	0
$\mathcal{X}_4$	0	0	0	<b>L</b>	<b>D</b>	<b>U</b>
$K$	0	0	0	0	<b>L</b>	<b>D</b>

Рис. 3.4. Блочнo-диагональнoй вид матрицы интенсивностей переходов МП  $X(t)$

Здесь  $D$  - диагональные блоки,  $L$  - нижние диагональные блоки, описывающие обслуживание запроса, и  $U$  - верхние диагональные блоки, описывающие поступление новых запросов.

**Утверждение.** Функция распределения времени  $\tau_i, i = 3,4$ , может быть записана как

$$F_{\tau_i} = p_{(\tau_{i,i-1})}^{(i)}(t), i \in \{2,3\}, \quad (3.11)$$

а ее математическое ожидание и дисперсия могут быть представлены в виде

$$E_{\tau_i} = \int_0^\infty t \left( \mu P_{(\tau_{i+1}-1,i),(\tau_{i,i-1})}^{(i)}(t) - (p_2\lambda_2 + \mu)P_{(\tau_{i+1},i),(\tau_{i,i-1})}^{(i)}(t) + p_2\lambda_2 P_{(\tau_{i+1}+1,i),(\tau_{i,i-1})}^{(i)}(t) \right) dt, i \in \{2,3\}, \quad (3.12)$$

$$D_{\tau_i} = E(\tau_i^2) - E^2(\tau_i), i \in \{2,3\}. \quad (3.13)$$

**Доказательство.** Мы рассматриваем поведение усеченного по сравнению с (3.5-3.6) марковского процесса, показанного на рис. 3.5

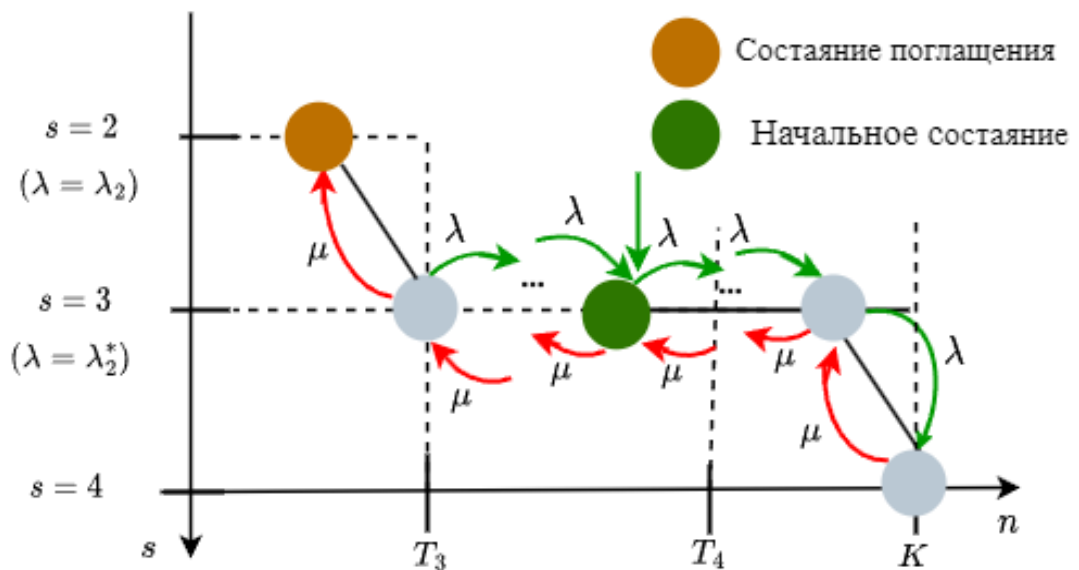


Рис. 3.5. Диаграмма переходов состояний для усеченного марковского процесса  $X^{(4)}(t)$

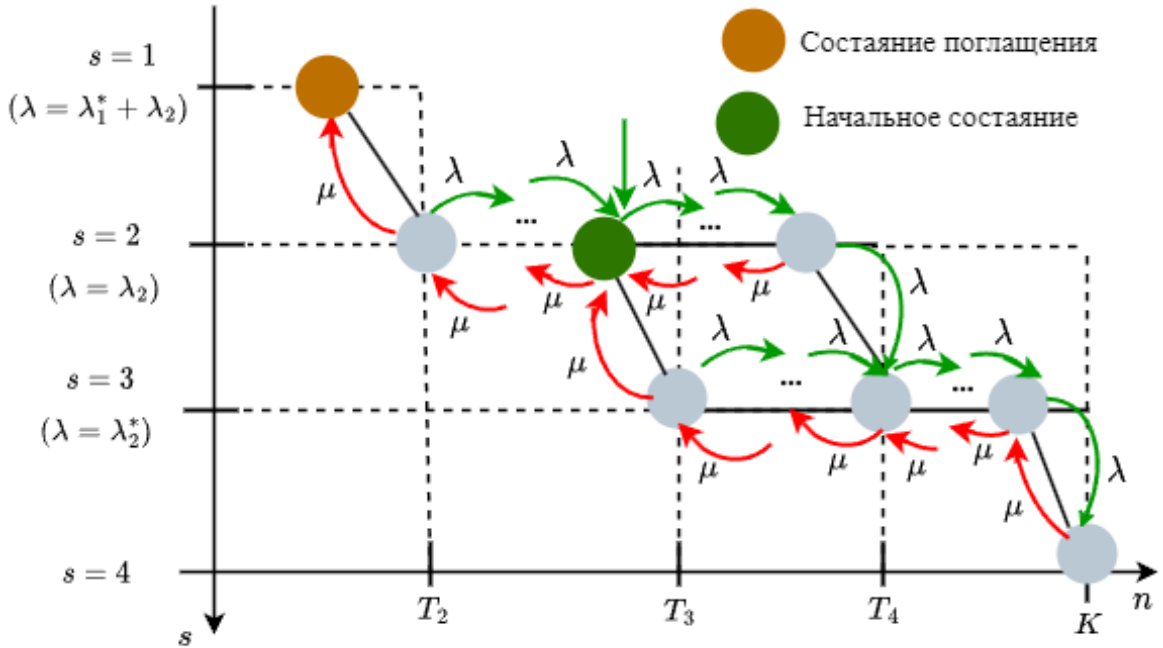


Рис. 3.6. Диаграмма переходов состояний для усеченного марковского процесса  $X^{(3)}(t)$

Для этих процессов зеленый круг соответствует начальному состоянию, а оранжевый круг изображает состояние поглощения, в котором находится выход из усеченного процесса. При этом, векторы начальных состояний могут быть записаны в виде:

$$P^{(i)}(0) = \begin{cases} 1, & (n, s) \in (T_{i+1}, i) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, i \in \{2, 3\}. \quad (3.15)$$

$A^{(3)}$	$(1, T_2 - 1)$	$\mathcal{X}_3$	$\mathcal{X}_4$	$K$
$(1, T_2 - 1)$	$D$	$U$	0	0
$\mathcal{X}_3$	$L$	$D$	$U$	0
$\mathcal{X}_4$	0	$L$	$D$	$U$



$K$	$0$	$0$	$L$	$D$
-----	-----	-----	-----	-----

Рис. 3.7. Матрица интенсивностей переходов для МП  $X^{(3)}(t)$

Матрицы для усеченного процесса также имеют блочно-диагональную форму и могут быть получены из (3.11), как показано на рис. 3.7-3.8.

$A^{(4)}$	$(2, T_3 - 1)$	$\mathcal{X}_4$	$K$
$(1, T_2 - 1)$	$D$	$U$	$0$
$\mathcal{X}_4$	$L$	$D$	$U$
$K$	$0$	$L$	$D$

Рис. 3.8. Матрица интенсивностей переходов для МП  $X^{(4)}(t)$

Функция распределения случайных величин  $\tau_4$  и  $\tau_3$  представляет собой вероятность перехода из начального состояния в состояние поглощения, т.е.

$$F_{\tau_3}(t) = P_{(2, T_3), (1, T_2 - 1)}, \quad (3.16)$$

$$F_{\tau_4}(t) = P_{(3, T_4), (2, T_3 - 1)}. \quad (3.17)$$

Поскольку  $F_{\tau_i}(t)$  является вероятностью перехода из начального состояния в состояние поглощения для соответствующих случаев, ее можно вывести из формулы (3.18)

$$p^{(i)}(t) = P^{(i)}(0)P^{(i)}(t). \quad (3.18)$$

Решая соответствующие уравнения, мы получаем

$$P_{(2, T_3), (1, T_2 - 1)} = p_{(1, T_2 - 1)}(t), \quad (3.19)$$

$$P_{(3, T_4), (2, T_3 - 1)} = p_{(2, T_3 - 1)}(t). \quad (3.20)$$

**Утверждение доказано.**

### 3.3 Анализ модели управления с несколькими порогами

В этом разделе мы представляем результаты расчетов по вышеупомянутым представляющим интерес показателям. Системные параметры приведены в

таблице 3.1. Здесь нагрузка на систему в нормальном состоянии – это общая нагрузка на систему от обоих типов трафика в наихудшем случае, когда ни один из типов трафика не уменьшается, т.е.  $\rho = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu}$ . Также, из представленных данных можно заметить, что система переходит в состояние оповещения только тогда, когда занята половина буфера, поскольку  $T_3 = K / 2$ . Соотношение скорости первого ко второму типу трафика показывает, насколько чаще система получает сообщения первого типа по сравнению со вторым типом.

Таблица 3.1 Системные параметры по умолчанию

Параметр	Значение	Описание
$K$	40	Объём буфера
$T_1$	10	Первый порог
$T_2$	15	Порог снижения нагрузки
$T_3$	20	Третий порог
$T_4$	30	Порог перегрузки
$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$	$\frac{3}{2}$	Соотношение первого и второго типов трафика
$\mu$	1	Скорость обслуживания
$p_1$	0.5	Предупреждающего типа трафик параметр снижения
$p_2$	0.8	Оповещения тип трафика параметр снижения
$\rho$	0, ..., 3	Нагрузка в нормальном состоянии системы

Первый и второй параметры уменьшения типов трафика показывают процент указанного типа трафика, принимаемого системой в состояниях пониженной нагрузки и перегрузки соответственно. На рис. 3.9 показана функция распределения времени системного предупреждения  $\tau_2$  и среднее время, которое система проводит в состоянии перегрузки  $\tau_3$  при различной нагрузке. Можно заметить, что при низкой нагрузке  $\rho = 3$  обе функции демонстрируют обычное поведение. Однако при высокой нагрузке системы  $\rho \geq 3$ , функция распределения перегрузки растет намного быстрее, чем функция распределения оповещения. Это

связано с тем, что при такой нагрузке система все еще может восстановиться из состояния перегрузки, поскольку благодаря механизму гистерезисного управления система не получает избыточной нагрузки, поскольку принятая нагрузка составляет только  $p_2 \lambda_2 = 0.96 < 1$ . В то время как для состояния оповещения допустимая нагрузка равна  $\lambda_2 = 1.2 > 1$ , что приводит к тому, что сервер не может обслуживать сообщения.

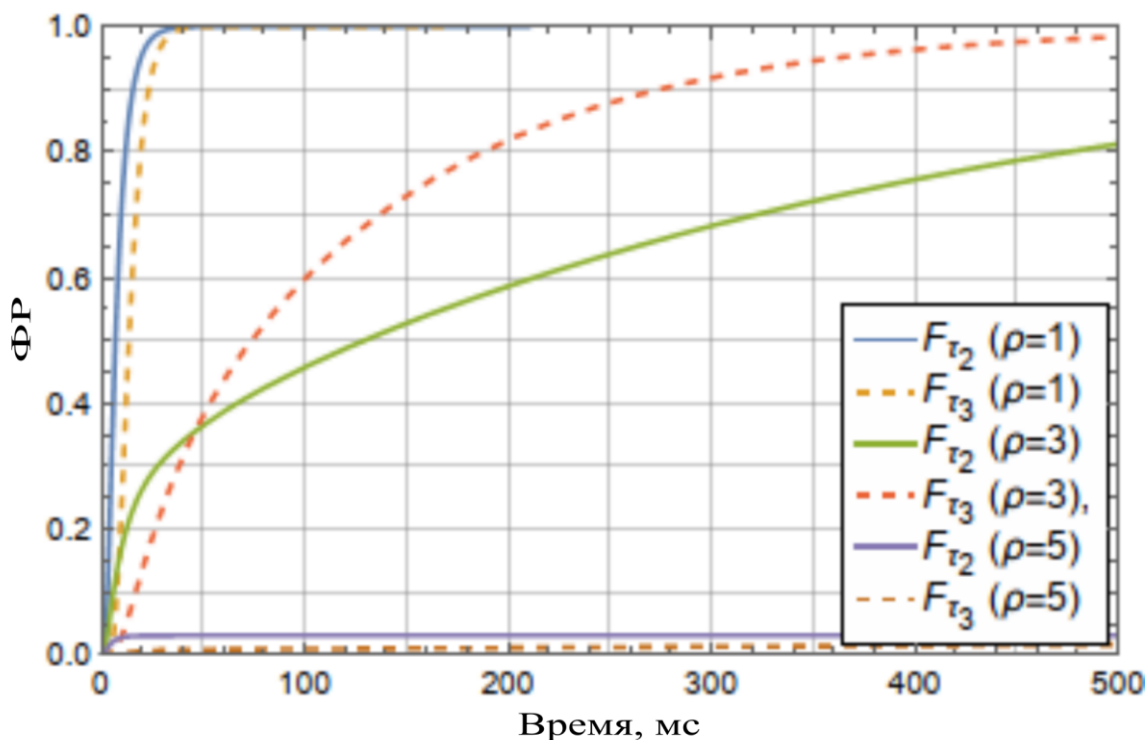


Рис. 3.9. ФР времени пребывания в состояниях тревоги и перегрузки

Однако нагрузка увеличилась еще больше до  $\rho = 5$ , чтобы вернуться в состояние пониженной нагрузки, в результате чем больше времени проходит, тем меньше вероятность того, что система сможет выйти из состояния оповещения, что приведет к значительному снижению роста функции распределения. При еще более высокой нагрузке графики снова ведут себя аналогично сценарию с низкой нагрузкой, за исключением того, что теперь они оба растут намного медленнее из-за низкой вероятности выхода из соответствующего состояния.

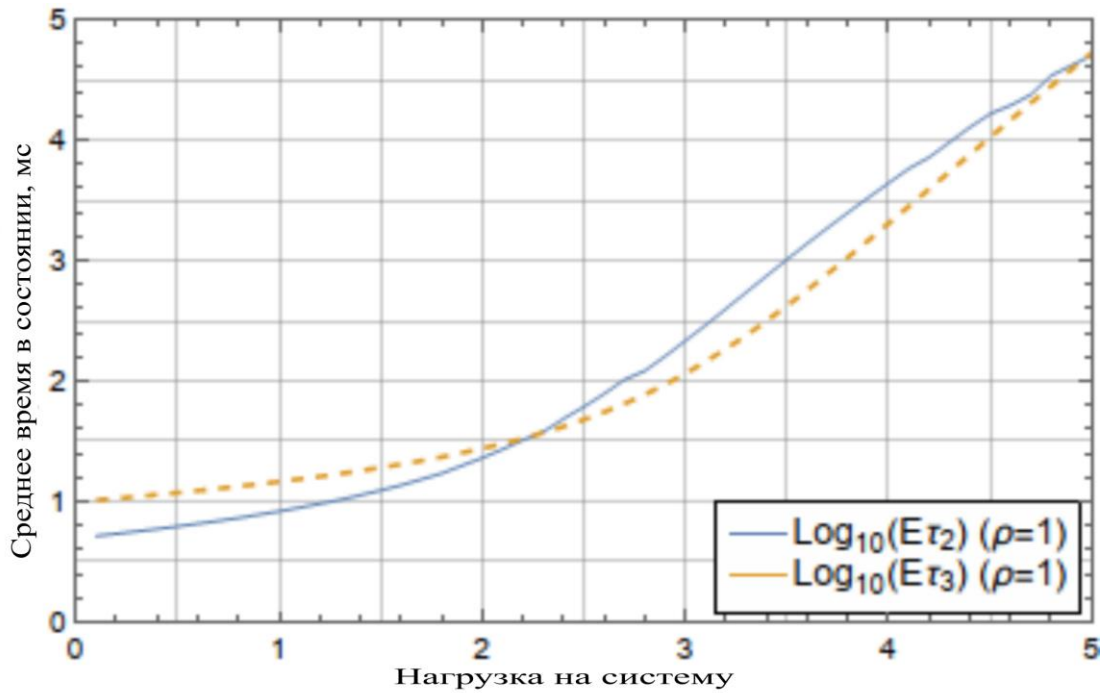


Рис. 3.10. Среднее время, которое система проводит в состояниях тревоги и перегрузки

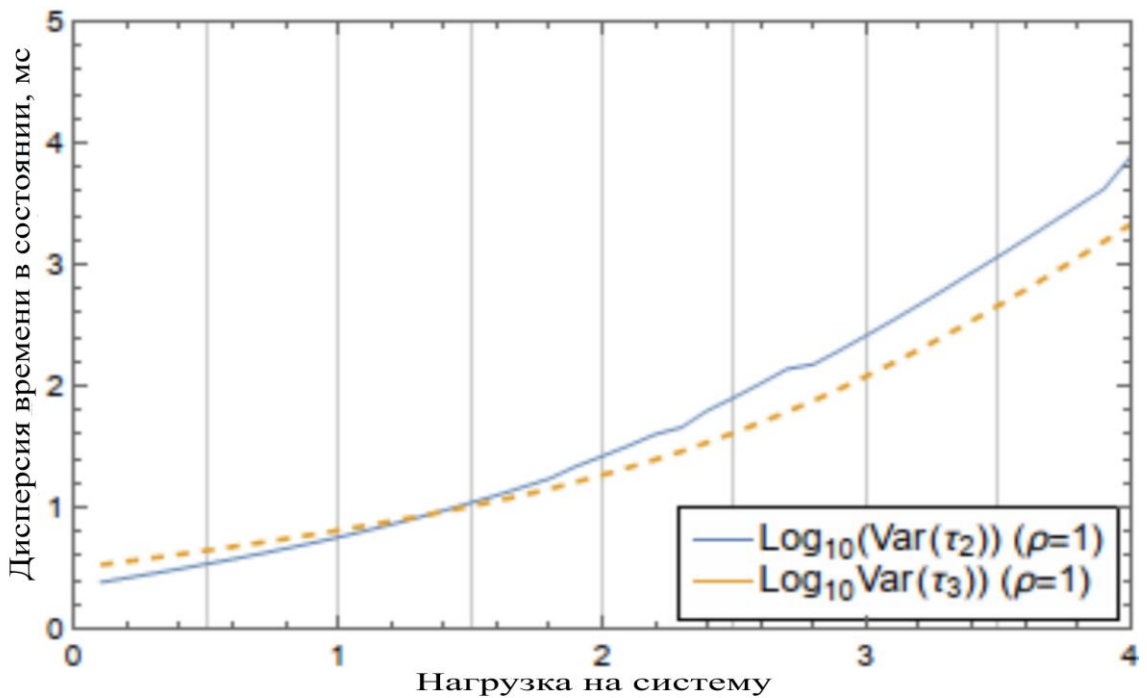


Рис. 3.11. Дисперсия времени, которое система проводит в состояниях тревоги и перегрузки

На рис. 3.10 показано среднее системное время оповещения и перегрузки. На рис. 3.11 показана дисперсия для этих значений. Логарифмическая шкала предназначена для лучшей демонстрации поведения графиков. Аналогично рис.

3.9, графики сходятся при  $\rho = 2.2$ , где система испытывает большую нагрузку в состоянии тревоги, однако в состоянии перегрузки система все еще получает относительно низкую нагрузку. При  $\rho = 2.5$  нагрузка в состоянии тревоги достигает 1, в то время как нагрузка в состоянии перегрузки остается на уровне 0.8.

Продолжая далее увеличивать нагрузку на систему, при ее нахождении в состоянии перегрузки, пороговое управление также перестает справляться с получаемой нагрузкой. Нагрузка от получаемых пакетов в состоянии перегрузки достигает 1 при нагрузке системы  $\rho = 3.125$ , однако система по-прежнему выходит из этого состояния быстрее, чем из состояния оповещения, до  $\rho = 5$ , когда вновь наблюдается пересечение соответствующих графиков.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключении диссертационной работы сформулируем основные результаты и выводы диссертации.

1. Разработана модель порогового управления перегрузками в беспроводных распределенных сенсорных сетях. Модель в виде системы массового обслуживания с порогами сбрасывания перегрузки и снижения нагрузки позволяет оценить влияние порогового управления на вероятностно-временные характеристики системы.

2. Для двухпороговой модели управления перегрузкой получено стационарное распределение двумерного МП, описывающего поведение системы и основные вероятностно-временные характеристики системы. Проведен численный эксперимент, показывающий область применения модели по сравнению с улучшенным алгоритмом произвольного раннего обнаружения.

3. Построена модель многопорогового управления перегрузками в беспроводных распределенных сенсорных сетях. Разработан метод расчета вероятностно-временных характеристик системы в переходном режиме – функции распределения времени пребывания в множестве состояний перегрузки и превышенной нагрузки, а также среднего значения и дисперсии времени пребывания в множестве состояний перегрузки и превышенной нагрузки.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

WSN	Wireless Sensor Network, Беспроводная сенсорная сеть
IoT	Internet Of Things, Интернет вещей
QoS	Quality Of Service, Качество обслуживания,
SLAs	Service Level Agreements, Соглашения об уровне обслуживания
OVB	Outer Virtual Boundary, Внешняя виртуальная граница
IVB	Inner Virtual Boundary, Внутренняя Виртуальная Граница
SN	Sensor Node, Сенсорный узел
GW	Gateway, Шлюз
БД	База Данных
NB-IoT	Narrow Band-Iot, Узкополосный интернет вещей
LTE	Long Term Evolution, Долгосрочная эволюция
FIDS	Farmland Intrusion Detection System, Система обнаружения вторжений на сельскохозяйственные угодья
ССА	Congestion Control Architecture, Архитектура контроля перегрузки
BOS	Buffer Occurancy Status, Статус заполнения буфера
IREД	Improved Random Early Detection, Улучшенное случайное раннее обнаружение
SIP	Session Initiation Protocol, Протокол установления сессий
BBX	Вероятностно-временные характеристики
API	Application Programming Interface, Прикладной программный интерфейс
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network, Широкополосная сеть большой дальности действия
CSMA	Carrier Sense Multiple Access, Множественный доступ с разделением несущей

БПЛА	Беспилотный летательный аппарат
FDMA	Frequency Division Multiple Access, Множественный доступ с частотным разделением
СМО	Система массового обслуживания, Queueing System
TDMA	Time Division Multiple Access, Множественный доступ с разделением по времени
LPWAN	Low-Power Wide Area Network, Маломощная сеть широкой области действия
AQM	Active Queue Management, Активное управление очередью



## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\lambda_1$	Интенсивность поступления заявок 1 типа
$\lambda_2$	Интенсивность поступления заявок 2 типа
$p_1$	Вероятность принятия заявки 1 типа
$p_2$	Вероятность принятия заявки 2 типа
$q_1$	Вероятность сброса заявки 1 типа
$q_2$	Вероятность сброса заявки 2 типа
$X(t)$	Марковский процесс, описывающий систему
$\mathcal{X}$	Пространство состояний МП $X(t)$
$\mathcal{X}_0, \mathcal{X}_1, \mathcal{X}_2$	Подмножества множества $\mathcal{X}$
$L$	Нижний порог
$H$	Верхний порог
$K$	Размер буфера
$s$	Состояние системы
$n$	Число пакетов в системе
$f_m$	Вероятность сброса заявки в модели IRED
$p_{drop}(k)$	Порог сброса заявки
$\lambda$	Интенсивность поступления
$\lambda^*$	Сниженная интенсивность поступления
$\mu$	Интенсивность обслуживания
$\rho$	Нагрузка на систему
$T_1$	Порог нормального состояния
$T_2$	Порог снижения нагрузки
$T_3$	Порог оповещения
$T_4$	Порог перегрузки
$T_5$	Порог блокировки
$P$	Вероятность блокировки
$X^{(i)}(t)$	Усеченный марковский процесс
$\mathbf{A}^{(i)}$	Матрица интенсивностей переходов процесса $X^{(i)}(t)$

$\tau_2$	Среднее время в режиме пониженной нагрузки
$\tau_3$	Среднее время в состоянии перегрузки
$w$	Время пребывания в системе
$Q$	Средняя длина очереди
$\bar{\lambda}$	Средняя интенсивность поступления
$p$	Вероятность принятия
$\pi$	Вероятность потери

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М. Я. Кельберт, Ю. М. Сухов. Вероятность и статистика в примерах задачи. 2-е Изд. // М.: МЦНМО. 2010.
2. Г. Крамер. Математические методы статистики. // М.: НИЦ Регулярная и Хаотическая. 2003.
3. Л. Клейнрок. Стохастические потоки и задержки сообщений. // М.: Наука. 1970.
4. Н. И. Коваленко. Случайные процессы: Справочник. // Киев: Наука. Думка. 1983.
5. В. Феллер. Введение в теорию вероятностей и её приложения. Том 2. // М.: Мир. 1984.
6. П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. Теория массового обслуживания: Учебник. // М.: Изд-во. РУДН. 1995.
7. P. P. Bocharov, C. D'Apice, A. V. Pechinkin, S. SalerNo. Queueing Theory. // Boston: VSP. Brill Academic Publishers. 2004.
8. Г. П. Башарин, А.Л. Толмачев. Теория сетей массового обслуживания и ее приложения к анализу информационно-вычислительных систем. // Итоги науки и техники. Теория вероятностей. математическая статистика. теоритическая кибернетика. 1983.
9. Г. П. Башарин, П. П. Бачаров, Я. А. Коган. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. // М.: Наука. 1989.
10. В. М. Вишневский. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. // М.: Техносфера. 2003.
11. F. Baskett, K. M. Chandy, R. R. Muntz, and F. G. Palacios. Open, Closed, and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers. // J. ACM. 1975. Vol. 2. Pp. 248–260.
12. С. Н. Степанов. Основы телетрафика мультисервисных сетей. // М.: Эко-трендз. 2010.
14. Н. П. Бусленко. Моделирования сложных систем. // М.: Наука. 1968.

16. П. О. Абаев. Построение моделей и анализ вероятностных характеристик протокола установления сессий. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Российский университет дружбы народов. 2011. 97с.
17. M. Kaur, V. Verma and A. Malik. A Comparative Analysis of Various Congestion Control Schemes in Wireless Sensor Networks. // 2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence). 2018. Pp. 14-15. doi: 10.1109/CONFLUENCE.2018.8442449.
18. X. Wei and L. Wu. A New Proposed Sensor Cloud Architecture Based on Fog Computing for Internet of Things. // 2019 International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). 2019. Pp. 615-620. doi: 10.1109/iThings/GreenCom/CPSCom/SmartData.2019.00120..
19. M. F. Khan, R. K. Dwivedi and R. Kumar. Energy Efficient Data Transmission in Sensor Cloud: A Review. 2019. 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). 2019. Pp. 308-313. doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862759.
20. C. Sergiou, P. Antoniou and V. Vassiliou. A Comprehensive Survey of Congestion Control Protocols in Wireless Sensor Networks. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 1. No. 4. Pp. 1839-1859. doi: 10.1109/COMST.2014.2320071.
21. M. Jan, P. Nanda, M. Usman, and X. He. PAWN: a payload-based mutual authentication scheme for wireless sensor networks. // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2017. Vol. 29. No. 17. Pp. 1–10. doi: 10.1002/cpe.3986.
22. M. Usman, M. Ahmad Jan, and X. He. Cryptography-based secure data storage and sharing using HEVC and public clouds. // Information Sciences. 2017. Vol. 387. No. 2017. Pp. 90–102. doi: 10.1016/j.ins.2016.08.059.

23. Khan, Fazlullah & Nakagawa, Kenji. B-8-10 Cooperative Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Networks. // 2012. Vol. 2012. Pp.152.
24. D. Puthal, B. Sahoo, and B. P. S. Sahoo. Effective Machine to Machine Communications in Smart Grid Networks. // ARPN Journal of Systems and Software. 2012. Vol. 2. No. 1. Pp. 18–22.
25. M. A. Jan, S. R. U. Jan, M. Alam, A. Akhunzada, and I. U. Rahman. A Comprehensive Analysis of Congestion Control Protocols in Wireless Sensor Networks. // Mobile Networks and Applications. 2018. Vol. 23. No. 3. Pp. 456–468. doi: 10.1007/s11036-018-1018-y.
26. M. Shah, M. Y. Khan, M. N. Hayat, and R. Jan. Congestion Control in Wireless Sensor Networks- An overview of Current Trends. // International Journal of Science and Engineering A Publications. 2016. Vol. 5. No. 5. Pp. 273–279.
27. A. G. Neiat, A. Bouguettaya, T. Sellis and S. Mistry. Crowdsourced Coverage as a Service: Two-Level Composition of Sensor Cloud Services. // in IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2017. Vol. 29. No. 7. Pp. 1384-1397. doi: 10.1109/TKDE.2017.2672738.
28. M. Alkhatami, L. Alazzawi, and A. Elkateeb. Border surveillance and intrusion detection using wireless sensor networks. // International Journal of Advanced Engineering and Technology. 2015. Vol. 8. No. 2. Pp. 17–29.
29. S. Li, Q. Xu, J. Gaber, Z. Dou, and J. Chen. Congestion Control Mechanism Based on Dual Threshold DI-RED for WSNs. // Wireless Personal Communications. 2020. Vol. 115. No. 3. Pp. 2171–2195. doi: 10.1007/s11277-020-07676-6.
30. Boudriga N. On a Controlled Random Deployment WSN-Based Monitoring System Allowing Fault Detection and Replacement. // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2014. Vol.10. No.4. doi:10.1155/2014/101496.
31. F. Maita and L. Maiolo. Low power Wireless Sensor Network for precision agriculture: A battery-less operation scenario. // 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry. 2021. Pp. 75–79. doi: 10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628772.

32. Huang J, Du D, Duan Q. et al. Modeling and Analysis on Congestion Control for Data Transmission in Sensor Clouds. // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2014. Vol. 10. No. 3. doi:10.1155/2014/453983.
33. B. Aliyu, M. Egor, and M. Evgeny. Queueing Model of Hysteretic Congestion Control for Cloud Wireless Sensor Networks. // 2021 13<sup>th</sup> International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) Brno, Czech Republic. IEEE. 2021. Pp. 104–108. doi: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631576.
34. Techopedia. What does Wireless Sensor Network (WSN) mean? // Wireless Sensor Network (WSN). 2019. <https://www.techopedia.com/definition/25651/wireless-sensor-network-wsn>. (accessed Oct. 28, 2019).
35. Peter Mell and Tim Grance. The NIST Definition of Cloud Computing\_On-demand self-service. // Nist. 2009. <http://www.nist.gov/itl/cloud/upload/cloud-def-v15.pdf>. (accessed Oct. 29, 2019).
36. R. K. Dwivedi and R. Kumar. Sensor Cloud: Integrating Wireless Sensor Networks with Cloud Computing. // 2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). 2018. Pp. 1-6. doi: 10.1109/UPCON.2018.8597008.
37. M. Polese, F. Chiariotti, E. Bonetto, F. Rigotto, A. Zanella and M. Zorzi. A Survey on Recent Advances in Transport Layer Protocols. // in IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21. No. 4. Pp. 3584-3608. doi: 10.1109/COMST.2019.2932905.
38. G. Papastergiou. et al. De-Ossifying the Internet Transport Layer: A Survey and Future Perspectives. // in IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 19. No. 1. Pp. 619-639. Firstquarter 2017. doi: 10.1109/COMST.2016.2626780.
39. K. Xiong and H. Perros. Service Performance and Analysis in Cloud Computing. // 2009 Congress on Services – I. Los Angeles. CA. USA. 2009. Pp. 693-700. doi: 10.1109/SERVICES-I.2009.121.
40. W. Ellens, M. ivkovic, J. Akkerboom, R. Litjens and H. van den Berg. Performance of Cloud Computing Centers with Multiple Priority Classes. // 2012 IEEE Fifth

- International Conference on Cloud Computing. 2012. Pp. 245-252. doi: 10.1109/CLOUD.2012.96.
41. Yang, B., Tan, F., Dai, YS., Guo, S. Performance Evaluation of Cloud Service Considering Fault Recovery. // Lecture Notes in Computer Science. 2009. Vol 5931: Cloud Computing. Springer. Pp. 571–576. Doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10665-1\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10665-1_54).
  42. J. Medhi. Stochastic Models in Queuing Theory. 2nd Edition. // Academic Press. 2003.
  43. M. Abu Sharkh, M. Jammal, A. Shami and A. Ouda. Resource allocation in a network-based cloud computing environment: design challenges. // in IEEE Communications Magazine. November 2013. Vol. 51. No. 11. Pp. 46-52. doi: 10.1109/MCOM.2013.6658651.
  44. F. Xu, F. Liu, H. Jin and A. V. Vasilakos. Managing Performance Overhead of Virtual Machines in Cloud Computing: A Survey, State of the Art, and Future Directions. // in Proceedings of the IEEE. 2014. Vol. 102. No. 1. Pp. 11-31. doi: 10.1109/JPROC.2013.2287711.
  45. Y. Gaidamaka, A. Pechinkin and R. Razumchik. Time-related stationary characteristics in queueing system with constant service time under hysteretic policy. // 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2014. Pp. 534-540, doi: 10.1109/ICUMT.2014.7002158.
  46. U. K. Egham. Gartner Says 5.8 Billion Enterprise and Automotive IoT Endpoints Will Be in Use in 2020. // Gartner Newsroom Press Releases. 2019. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-08-29-gartner-says-5-8-billion-enterprise-and-automotive-io>. (accessed Oct. 06, 2021).
  47. S. Suja Golden Shiny and K. Murugan. TSDN-WISE: Automatic Threshold-Based Low Control-Flow Communication Protocol for SDWSN. // in IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. No. 17. Pp. 19560-19569. doi: 10.1109/JSEN.2021.3088604.

48. P. Grossetete. IoT and the Network: What is the future? // Cisco Blogs. 2020. <https://blogs.cisco.com/networking/iot-and-the-network-what-is-the-future>. (accessed Jan. 20, 2023).
49. Y. V. Gaidamaka. Model with threshold control for analyzing a server with an SIP protocol in the overload mode. // Automatic Control Computer Science. 2013. Vol. 47. No. 4. Pp. 211–218. doi: 10.3103/S0146411613040044.
50. V. Petrov. et al. Vehicle-Based Relay Assistance for Opportunistic Crowdsensing Over Narrowband IoT (NB-IoT). // in IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5. No. 5. Pp. 3710-3723. doi: 10.1109/IIOT.2017.2670363.
51. М.А. Красносельский, А.В. Покровский Системы с гистерезисом. // М. Наука. 1983.
52. M. Bagaа, Y. Challal, A. Ksentini, A. Derhab and N. Badache. Data Aggregation Scheduling Algorithms in Wireless Sensor Networks: Solutions and Challenges. // in IEEE Communications Surveys & Tutorials. Third Quarter 2014. Vol. 16. No. 3. Pp. 1339-1368. doi: 10.1109/SURV.2014.031914.00029.
53. M. Stusek et al. Optimizing NB-IoT Communication Patterns for Permanently Connected mMTC Devices. // 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2022. Pp. 1413-1418. doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771847.
54. T. Polonelli, Y. Qin, E. M. Yeatman, L. Benini, and D. Boyle. A Flexible, low-power platform for uav-based data collection from remote sensors. // IEEE Access. Vol. 8. Pp. 164775–164785. 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3021370.
55. E. R. Ovwigho, Y. Chepurko, O. Y. Kazenkov, D. N. Ermakov, S. P. Onini, and B. A. Yauri. Renewable energy in sustainable electricity and economic development: The case of Nigeria. // International Journal of Energy Economics and Policy. 2020. Vol. 10. No. 1. Pp. 165–169. doi: 10.32479/ijeep.8836.
56. V. Petrov, M. Gapeyenko, D. MoltchaNov, S. Andreev and R. W. Heath. Hover or Perch: Comparing Capacity of Airborne and Landed Millimeter-Wave UAV Cells. // in IEEE Wireless Communications Letters. 2020. Vol. 9. No. 12. Pp. 2059-2063. doi: 10.1109/LWC.2020.3012552.



57. M. Gapeyenko, V. Petrov, D. MoltchaNov, S. Andreev, N. Himayat and Y. Koucheryavy. Flexible and Reliable UAV-Assisted Backhaul Operation in 5G mmWave Cellular Networks. // in IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. Vol. 36. No. 11. Pp.2486-2496. doi: 10.1109/JSAC.2018.2874145.
58. N. Tafintsev et al. Handling Spontaneous Traffic Variations in 5G+ via Offloading Onto mmWave-Capable UAV “Bridges”. // in IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. No. 9. Pp. 10070-10084. doi: 10.1109/TVT.2020.3005253.
59. S. Kavuri, D. MoltchaNov, A. Ometov, S. Andreev and Y. Koucheryavy. Performance Analysis of Onshore NB-IoT for Container Tracking During Near-the-Shore Vessel Navigation. // in IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7. No. 4. Pp. 2928-2943. doi: 10.1109/JIOT.2020.2964245.
60. Komarov, M., MoltchaNov, D. System Design and Analysis of UAV-Assisted BLE Wireless Sensor Systems. // In: Mamas, L., Matta, I., Papadimitriou, P., Koucheryavy, Y. (eds) Wired/Wireless Internet Communications. WWIC 2016. Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol 9674. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33936-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33936-8_22).
61. M. B. Ghorbel, D. Rodríguez-Duarte, H. Ghazzai, M. J. Hossain and H. MeNouar. Joint Position and Travel Path Optimization for Energy Efficient Wireless Data Gathering Using Unmanned Aerial Vehicles. // in IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68. No. 3. Pp. 2165-2175. doi: 10.1109/TVT.2019.2893374.
62. M. H. M. Ghazali, K. Teoh, and W. Rahiman. A Systematic Review of Real-Time Deployments of UAV-Based LoRa Communication Network. // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 124817–124830. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3110872.
63. А. Башир, Е. А. Мачнев, Е. В. Мокров. Гистерезисное управление нагрузкой в беспроводных сенсорных сетях. // Информатика и ее Применения, 2022. Т.16. Вып. 3. С. 83-89, DOI: 10.14357/19922264220311.

64. А. Башир, Е. В. Мокров. Модель контроля перегрузок в облачных системах беспроводных сенсорных сетей. // Conf. Proc. Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems 2021. Moscow, Russia. pp. 25-27.
65. A. Bashir, E. Mokrov. Farmland Intrusion Detection with Cloud Wireless Sensor Networks Using Hysteretic Congestion Control. // Conf. Proc. Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems 2022. Moscow, Russia. pp. 21-24.
66. Aliyu, B., Mokrov, E., Samouylov, K. Multi-threshold Hysteresis-Based Congestion Control for UAV-Based Detection Sensor Network. In: Koucheryavy, Y., Aziz, A. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. // NEW2AN 2022. Lecture Notes in Computer Science. Springer. Cham. 2023. Vol. 13772. Pp. 585–594. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30258-9\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30258-9_52).
67. A. Bashir. An Analysis of Non-stationary States of Multi threshold Hysteresis Based Congestion Control for UAV-based Detection Sensors. // Conf. Proc. Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modelling of High-Tech Systems 2023. Pp. 53–58. Moscow, Russia. <https://events.rudn.ru/event/198/attachments/550/1474/ittmm-2023.pdf>
68. A. Chydzinski. Non-Stationary Characteristics of AQM Based on the Queue Length. // *Sensors*. 2023. vol. 23. no. 1. doi: 10.3390/s23010485.
69. A. A. Rezaee, M. H. Yaghmaee, A. M. Rahmani, and A. H. Mohajerzadeh. HOCA: Healthcare aware optimized congestion avoidance and control protocol for wireless sensor networks. // *Journal of Network and Computer Applications*. 2014. vol. 37, no. 1. pp. 216–228. doi: 10.1016/j.jnca.2013.02.014.
70. A. A. Rezaee and F. Pasandideh. A Fuzzy Congestion Control Protocol Based on Active Queue Management in Wireless Sensor Networks with Medical Applications. // *Wireless Personal Communications*. 2018. vol. 9. no. 1. pp. 815–842. doi: 10.1007/s11277-017-4896-6.

71. E. A. Asonye and S. M. Musa. Analysis of personal area networks for zigbee environment using random early detection-active queue management model. // Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Toronto, Canada. 2019. pp. 1441–1455.
72. H. Kumar, S. M. D. Kumar, and E. Nagarjun. Congestion Estimation and Mitigation Using Fuzzy System in Wireless Sensor Network. // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. vol. 329. pp. 655–667. doi: 10.1007/978-981-16-6246-1\_56.
73. A. Fotouhi, M. Ding, and M. Hassan. Deep q-learning for two-hop communications of drone base stations. // *Sensors*. 2021. vol. 21. no. 6. pp. 1–14. doi: 10.3390/s21061960.
74. И.С. Зарядов, А.В. Королькова. Модель расчета показателей RED-подобных алгоритмов с помощью систем с групповым входящим потоком. // сборник трудов конференции Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2011) М., 2011. С. 65-72.
75. А.В. Королькова, Д.С. Кулябов. Математическая модель динамики поведения параметров систем типа RED. // Вестник РУДН. Математика. Информатика. Физика. 2010. Т. 2 Вып.1. С. 68-76.
76. А.В. Королькова, Д.С. Кулябов, А.И. Черноиванов. К вопросу о классификации алгоритмов RED. // Вестник РУДН. Математика. Информатика. Физика. 2009. Вып.3. С. 34-46.
77. L. Kleinrock, Queueing systems, volume 1: Theory. Wiley New York. – 1976. – Vol. 66.
78. Дараселия А.В., Сопин Э.С., Рыков В.В, On optimization of energy consumption in cloud computing system // Proceedings of the Selected Papers of the 12th International Workshop on Applied Problems in Theory of Probabilities and Mathematical Statistics (Summer Session) in the framework of the Conference on Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems (АРТР+MS'2018). – 2018. – Pp. 23–31. <http://ceur-ws.org/Vol-2332/paper-03-005.pdf>.

79. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика // Учеб. пособие. Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Изд-во РУДН. – 2009. – С. 342.
80. Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». – 1989. – 336 с.
81. Башарин Г.П., Толмачев А.Л. Теория сетей массового обслуживания и ее приложения к анализу информационно-вычислительных систем // Итоги науки и техники. Серия «Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика». – 1983. – Т. 21. – С. 3–119.
82. Башарин Г.П., Харкевич А.Д., Шпенс-Шнеппе М.А. Массовое обслуживание в телефонии. – М.: Наука. – 1968. – 247 с.
83. Basharin G. P., Samouylov K. E., Yarkina N. V., Gudkova I. A. A new stage in mathematical teletraffic theory // Automat. Rem. Contr. – 2009. – Vol. 70. No. 12. – P. 1954– 1964.
84. Bocharov P.P., D'Apice C., Pechinkin A.V., and Salerno S. Queueing Theory. – Brill Academic Publishers. – 2004. – 457 p.
85. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера. – 2003. – 512 с.
86. Вишневский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И. Стохастические системы с корреляционными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М.: Техносфера. – 2018.
87. Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G // М.: Техносфера. – 2009. – С. 472.
88. Вишневский В.М., Семенова О.В. Системы поллинга. Теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. – М.: Техносфера, – 2007. – 312 с.
89. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е., Сети связи пост-NGN // СПб: БХВПетербург. – 2013. – С. 160.
90. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета // М.:ФГУП ЦНИИС. – 2008. – С. 296

91. Моисеева С.П., Панкратова Е.В., Убонова Е.Г. Исследование бесконечнолинейной системы массового обслуживания с разнотипным обслуживанием и входящим потоком марковского восстановления // Вестник Томского государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2016. – № 2. – Вып. 35. – С. 46–53.
92. Сонькин М.А., Моисеев А.Н., Сонькин Д.М., Буртовая Д.А. Объектная модель приложения для имитационного моделирования циклических систем массового обслуживания // Вестн. Том. гос. ун-та. УВТиИ. – 2017. – № 40. – С. 71–80.
93. Moiseev A., Nazarov A. Asymptotic Analysis of the Infinite-Srever Queueing System with High-Rate Semi-Arrivals // Proc. of the IEEE International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT 2014). – St. Petersburg: IEEE. – 2014. – Pp. 607–613.
94. Moltchanov D., Survey paper: Distance distributions in random networks // Ad Hoc Netw. – 2021. – Vol. 10, no. 6. – Pp. 1146–1166.
95. Moltchanov D., Samuylov A., Petrov V., Gapeyenko M., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y, Improving session continuity with bandwidth reservation in mmwave communications, // IEEE Wireless Communications Letters. – 2019. – Vol. 8, no. 1. – Pp. 105–108.
96. Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория вероятностей и случайных процессов // Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2006. – С. 204.
97. Наумов В.А. Численные методы анализа марковских систем // М.: Изд-во УДН. – 1985. – С. 37.
98. Naumov V., Samouylov K., Yarkina N., Sopin E., Andreev S., and Samuylov A. LTE performance analysis using queueing systems with finite resources and random requirements // Proc. of the 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT-2015 (October 6–8, 2015, Brno, Czech Republic). – USA, New Jersey, Piscataway, IEEE. – 2015. – P. 100–103.

99. Naumov V.A., Samouylov K.E., On the modeling of queuing systems with multiple resources // PFUR Bulletin, Series Informatics. Mathematics. Physics. – 2014. – Vol. 3. – Pp. 58–62.
100. Naumov, V.A., Samuilov, K.E., Samuilov, A.K., On the total amount of resources occupied by serviced customers // Autom Remote Control. – 2016. – Vol. 77, issue 8. – Pp. 1419–1427.
101. Корнышев Ю.Н., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь. – 1996. – 272 с.
103. Kelly F. P. Loss networks // Ann. Appl. Probab., – 1991. – No. 1. – P. 319–378.
104. Kelly F.P. Reversibility and Stochastic Networks. – New York: J. Wiley & Sons. – 1979. – Pp. 630.
105. Ross K.W. Multiservice loss models for broadband telecommunication networks // Springer-Verlag. – 1995. – Pp. 343.
106. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей // М.: Изд-во «Эко-Трендз». – 2010. – С. 392.
107. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения // М.: Горячая линия – Телеком. – 2015. – 868 с
108. Степанов С.Н., Степанов М.С. Планирование ресурса передачи при совместном обслуживании мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных // Автоматика и Телемеханика. – 2017. – №11. – С. 79–93.
109. Iversen V.B. Teletraffic engineering and network planning // ITU-D. – May 2011. – Pp. 567.
110. А. В. Горбунова, В. А. Наумов, Ю. В. Гайдамака, К. Е. Самуйлов, Ресурсные системы массового обслуживания как модели беспроводных систем связи // Информ. и её примен. – 2018. – 12:3. – С. 48–55
111. А. В. Горбунова, В. А. Наумов, Ю. В. Гайдамака, К. Е. Самуйлов, Ресурсные системы массового обслуживания с произвольным обслуживанием // Информ. и её примен. – 2019. – 13:1. – С. 99–107

113. E. Sopin, K. Samouylov, S. Shorgin, The analysis of the computation offloading scheme with two-parameter offloading criterion in fog computing // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Pp. 11–20. doi:10.1007/978-3-030-34914-1\_2.
114. E. Sopin, N. Zolotous, K. Ageev, S. Shorgin, Analysis of the response time characteristics of the fog computing enabled real-time mobile applications // 20th International Conference NEW2AN 2020, Lecture Notes in Computer Science 12525. – 2020. – Pp. 764–779. doi:10.1007/978-3-030-65726-0\_9
115. Р. В. Разумчик, А. И. Зейфман, А. В. Коротышева, Я. А. Сатин, Анализ энергоэффективности вычислительного комплекса, моделируемого с помощью системы обслуживания с пороговым управлением и интенсивностями, зависящими от времени // Системы и средства информ. – 2015. – 25:4. –С. 19–30
116. А. И. Зейфман, В. Е. Бенинг, И. А. Соколов, Марковские цепи и модели с непрерывным временем // М.: Элекс-КМ. – 2008.
117. Zeifman A.I., Korolev V.Yu, Sipin A.S.(Eds ), Stability Problems for Stochastic Models. Theory and Applications // MDPI, Basel, Switzerland, ISBN 978-3-0365-0452-0. – 2021. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0453-7>
118. Kochetkova I, Satin Y, Kovalev I, Makeeva E, Chursin A, Zeifman A. Convergence Bounds for Limited Processor Sharing Queue with Impatience for Analyzing Non-Stationary File Transfer // Wireless Network. Mathematics. – 2022. – 10(1):30. <https://doi.org/10.3390/math10010030>.
119. Y.A. Satin, R.V. Razumchik, A.I. Zeifman, I.A. Kovalev, Upper bound on the rate of convergence and truncation bound for non-homogeneous birth and death processes on  $Z$  // Applied Mathematics and Computation. – 2022. – Vol. 423. – 127009. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2022.127009>.
120. Gorbunova, A., Vishnevsky, V., Estimating the Response Time of a Cloud Computing System with the Help of Neural Networks // Systems Science and Applications. – 2022. – 20(3). – Pp. 105-112.

121. A. V. Gorbunova, I. S. Zaryadov, S. I. Matyushenko, K. E. Samouylov, S. Ya. Shorgin, The approximation of response time of a cloud computing system // Inform. Primen. – 2015. – 9:3. – Pp. 32–38.
113. E. Sopin, K. Samouylov, S. Shorgin, The analysis of the computation offloading scheme with two-parameter offloading criterion in fog computing // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Pp. 11–20. doi:10.1007/978-3-030-34914-1\_2.
114. E. Sopin, N. Zolotous, K. Ageev, S. Shorgin, Analysis of the response time characteristics of the fog computing enabled real-time mobile applications // 20th International Conference NEW2AN 2020, Lecture Notes in Computer Science 12525. – 2020. – Pp. 764–779. doi:10.1007/978-3-030-65726-0\_9
115. Р. В. Разумчик, А. И. Зейфман, А. В. Коротышева, Я. А. Сатин, Анализ энергоэффективности вычислительного комплекса, моделируемого с помощью системы обслуживания с пороговым управлением и интенсивностями, зависящими от времени // Системы и средства информ. – 2015. – 25:4. –С. 19–30
116. А. И. Зейфман, В. Е. Бенинг, И. А. Соколов, Марковские цепи и модели с непрерывным временем // М.: Элекс-КМ. – 2008.
117. Zeifman A.I., Korolev V.Yu, Sipin A.S.(Eds ), Stability Problems for Stochastic Models. Theory and Applications // MDPI, Basel, Switzerland, ISBN 978-3-0365-0452-0. – 2021. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0453-7>
118. Kochetkova I, Satin Y, Kovalev I, Makeeva E, Chursin A, Zeifman A. Convergence Bounds for Limited Processor Sharing Queue with Impatience for Analyzing Non-Stationary File Transfer // Wireless Network. Mathematics. – 2022. – 10(1):30. <https://doi.org/10.3390/math10010030>.
119. Y.A. Satin, R.V. Razumchik, A.I. Zeifman, I.A. Kovalev, Upper bound on the rate of convergence and truncation bound for non-homogeneous birth and death processes on  $Z$  // Applied Mathematics and Computation. – 2022. – Vol. 423. – 127009. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2022.127009>.



120. Gorbunova, A., Vishnevsky, V., Estimating the Response Time of a Cloud Computing System with the Help of Neural Networks // *Systems Science and Applications*. – 2022. – 20(3). – Pp. 105-112.
121. A. V. Gorbunova, I. S. Zaryadov, S. I. Matyushenko, K. E. Samouylov, S. Ya Shorgin, The approximation of response time of a cloud computing system // *Inform. Primen.* – 2015. – 9:3. – Pp. 32–38.
131. E. Markova, D. Moltchanov, I. Gudkova, K. Samouylov and Y. Koucharyavy Performance Assessment of QoS-Aware LTE Sessions Offloading Onto LAA/WiFi Systems // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – Pp. 36300–36311. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905035.
132. Башарин Г.П., Гайдамака Ю.В., Самуйлов К.Е., Яркина Н.В., Управление качеством и вероятностные модели функционирования сетей связи следующего поколения: учебное пособие // М. РУДН. –2008. – 157 с.
133. Naumov V.A., Gaidamaka Y.V., Yarkina N.V., Samouylov K.E., *Matrix and Analytical Methods for Performance Analysis of Telecommunication Systems* // Springer Nature Switzerland AG. – 2021. – 308 с.