

На правах рукописи

АЛИЮ БАШИР

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

Специальность 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов
Самуйлов Константин Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Моисеев Александр Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующего кафедрой программной инженерии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»;
Орлов Юрий Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий отделом Федерального исследовательского центра Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук,
Степанов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и систем коммутации Ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики».

Защита диссертации состоится 1 марта 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ПДС 0200.006 при Российском университете дружбы народов по адресу: Москва, ул. Орджоникидзе, дом 3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 0200.006,
канд. физ.-мат. наук, доц.



А.В. Демидова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Облачные беспроводные сенсорные сетевые системы – это продукты современных информационных и телекоммуникационных технологий. WSN и облачные вычисления — это новые технологии, соответственно, в области сетевых и вычислительных технологий. WSN интегрируют датчики и облачные вычисления в расширенную форму облачной инфраструктуры, которая управляет датчиками, расположенными по всей WSN. 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 гистерезисного управления нагрузкой. Эта работа использует гистерезисный подход в области информационных и телекоммуникационных технологий для решения проблемы перегрузки трафика в облачных беспроводных сенсорных сетях. В этой работе предложены механизмы для двухпорогового и многопорогового гистерезисного управления нагрузкой, а также были 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 СМО с гистерезисным управлением нагрузкой для аналитического моделирования контроля перегрузки в беспроводных сенсорных сетях. В модели изучаются показатели качества обслуживания QoS, такие как средняя длина очереди, вероятность потери приложения (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 НССМ, для эффективного внедрения улучшенной системы управления очередями для замены старых моделей, таких как RED, IRED и т.д., для которых характерны некоторые узкие места.

Степень разработанности темы. Для эффективного вычисления и анализа основных QoS ключевых показателей эффективности, упомянутых выше, используются модели в виде систем массового обслуживания и сетей. При построении и анализе таких моделей используются методы теории вероятностей, случайных процессов, теории массового обслуживания теории сетей массового обслуживания теории телетрафика и статистического моделирования сложных систем используются. К российским ученым, исследователям, внесшим большой вклад в эти области, относятся П.П. Бочаров, Г. П. Башарин, К.Е. Самуйлов, В.М. Вишневский, А.Н. Дудин, А.И. Зейфман, Гольдштейн Б.С, А.Е. Кучерявый, Е.А. Кучерявый, А.Н. Моисеев, С.П. Моисеева, Д.А. Молчанов, А.А. Назаров, В.А. Наумов, А.П. Пшеничников, В.В. Рыков, С.Н. Степанов, М.С. Степанов, И.И. Цитович, С.Я. Шоргин и др., а к зарубежным – M. Dohler, J.G. Andrews, F.P. Kelly, V.V. Iversen, L. Kleinrock, E. Gelenbe, Luis M Correia, K.W. Ross и др.

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

Цели и задачи исследования

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 WSN.
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 его пребывания в системе.

3. Построение и анализ модели многоступенчатого гистерезисного управления трафиком в сети WSN в виде системы массового обслуживания. Разработка метода расчета нестационарных характеристик системы – функции распределения, среднего и дисперсии времени пребывания системы в подпространствах состояний.

Научная новизна диссертационной работы

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 Марковского процесса, 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 телекоммуникационными компаниями, операторами сетей связи при планировании сетей радиодоступа для предоставления требуемого качества услуг. Разработанные математические модели позволяют провести анализ показателей эффективности в беспроводных распределенных сенсорных сетях с гистерезисным 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”.

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 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, в отличие от известных, позволяет рассчитать характеристики МП в нестационарном режиме, в том числе, функцию распределения времени пребывания в множестве состояний перегрузки и превышенной нагрузки.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов следует из применяемых строгих математических методов теории вероятностей, теории марковских случайных процессов, теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Обоснование полученных результатов проведено с помощью численных экспериментов на примере близких к реальным исходных данных.

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.)

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».

Публикации. Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 7 печатных изданиях [1-7], из которых издание [6] из списка ВАК/РУДН, а издания [1,2,5] входят в базы данных Scopus/WoS

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

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, представлены основные результаты диссертации, дана характеристика результатов по главам, изложена их научная новизна и практическая ценность.

Глава 1 посвящена особенностям построения моделей систем облачных беспроводных сенсорных сетей

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. Система смоделирована как $M|M|n|K$ с пуассоновским поступающим потоком заявок с интенсивностью λ , экспоненциальным обслуживанием с параметром μ и двумя порогами L и H . В случае превышения числом k заявок в системе порога L , входящий поток снижается согласно функции $p_{drop}(k)$ до момента, пока число заявок в системе не достигнет H , после чего функция принимает значение f_m , согласно уравнению (1).

$$p_{drop}(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq k < L, \\ \frac{(k-L)^2}{(H-L)^2} f_m, & \text{if } L \leq k < H, \\ f_m, & \text{if } L \leq k < K. \end{cases} \quad (1)$$

Также в этом разделе вычисляется значение среднего времени пребывания пакета в системе

Утверждение 1. Среднее время пребывания пакета в системе может быть определено как (2).

$$W = \frac{\sum_{k=0}^K k p_k}{\lambda \sum_{k=0}^{K-1} (1 - p_{drop}(k)) p_k}. \quad (2)$$

В разделе 1.3 дается постановка задачи

При разработке разделов 1.1 – 1.3 использовались публикации [2-4] с участием автора.

Глава 2 посвящена марковской модели управления очередью с гистерезисным пороговым управлением и сравнивает с помощью аналитической модели модель IRED и гистерезисную модель управления перегрузкой.

В разделе 2.1 представлена модель массового обслуживания с двухуровневым пороговым управлением. На систему с очередью размера K и одним прибором поступает пуассоновский поток заявок с интенсивностью λ . Обслуживание заявок происходит по экспоненциальному закону с параметром μ . В системе вводятся пороги L и H , согласно которым производится управление поступающим потоком. В случае, если число заявок в системе превышает порог H , входящий поток в систему фильтруется до среднего значения $\lambda^* < \lambda$, путем отклонения вновь поступившей заявки с заданной вероятностью p . Однако, в случае, если число заявок в системе падает ниже порога L , нагрузка возвращается до исходного значения. Таким образом, система может работать в одном из трех режимов $s \in \{0,1,2\}$: обычный режим, когда принимаются все новые запросы ($s = 0$), режим сниженной нагрузки, когда поток поступающих уменьшается за счет отклонения некоторых запросов ($s = 1$), и режим отказа, когда отклоняются все поступающие запросы ($s = 2$), поскольку в системе не осталось свободных мест.

Такая система может быть описана марковским процессом $X(t) = \{(s, n)(t), s \in \{0, 1, 2\}, n \in \{0, \dots, K\}\}$. Пространство состояний этого процесса можно разбить следующим образом:

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cup \mathcal{X}_1 \cup \mathcal{X}_2, \quad (3)$$

$$\mathcal{X}_0 = \{(s, n): s = 0, 0 \leq n \leq H - 1\}, \quad (4)$$

$$\mathcal{X}_1 = \{(s, n): s = 1, L \leq n \leq K - 1\}, \quad (5)$$

$$\mathcal{X}_2 = \{(s, n): s = 2, H + 1 \leq n \leq K\}. \quad (6)$$

где s – системный режим, а n – количество запросов в системе.

Для построенной системы в явном виде получено стационарное распределение вероятностей

Утверждение 2. Стационарное распределение вероятностей системы $M|M|1|\langle L, H \rangle|K$ имеет вид (7)

$$p_{0,k} = \rho^k p_{0,0}, k = 1, \dots, L - 1,$$

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

$$p_{1,k} = \frac{\rho^H (1 - \rho) (1 - \rho'^{k-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1}) (1 - \rho')} p_{0,0}, k = L, \dots, H, \quad (7)$$

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

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

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

$$a_0 = \frac{\rho^H (1 - \rho) (1 - \rho'^{H-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1}) (1 - \rho')}, \quad (8)$$

$$a_1 = \left(\frac{1 - \rho'^{H-L+2}}{1 - \rho'^{H-L+1}} + \frac{\rho'(1 - \rho')(1 - \rho^{H-L})}{(1 - \rho'^{H-L+1})(1 - \rho)} \right) \cdot \frac{\rho^H(1 - \rho)(1 - \rho'^{H-L+1})}{(1 - \rho^{H-L+1})(1 - \rho')} - \rho' \rho^{H-1}, \quad (9)$$

$$a_k = (\rho' + 1)a_{k-1} - \rho'a_{k-2}, k = 2, \dots, K - H - 1, \quad (10)$$

$$b_0 = 0, b_1 = 1, b_k = (\rho' + 1)b_{k-1} - \rho'b_{k-2}, k = 2, \dots, K - H - 1. \quad (11)$$

Основными вероятностными характеристиками системы являются вероятность потери заявки (12) и средняя длина очереди (13)

$$P = q \cdot \sum_{n=L}^{K-1} p_{1,n} + \sum_{n=H+1}^K p_{2,n}. \quad (12)$$

$$Q = \sum_{n=0}^{H-1} p_{0,n} + q \cdot \sum_{n=L}^{K-1} p_{1,n} + \sum_{n=H+1}^K p_{2,n}. \quad (13)$$

В разделе 2.3 посвящен численному анализу вероятностно-временных характеристик.

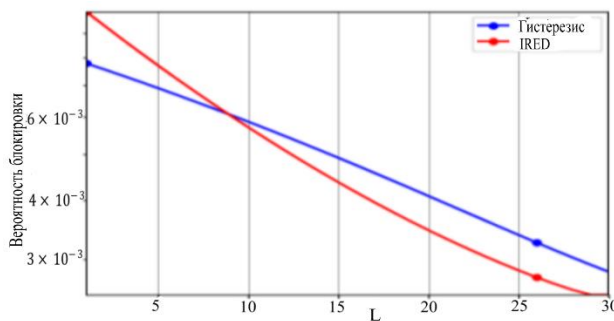


Рис. 1а Вероятность потери заявки

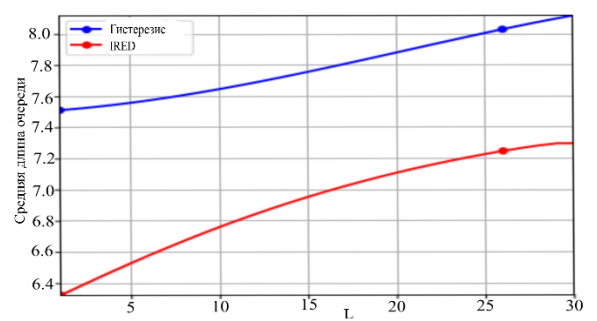


Рис. 1б Средняя длина очереди

Рис.1 Основные характеристики системы

На Рис. 1 представлены графики основных характеристик системы. Можно заметить, что вероятность блокировки для гистерезисного алгоритма изначально ниже, чем для алгоритма IRED. Однако с ростом L она увеличивается намного быстрее, при этом средняя длина очереди выше для всех рассмотренных пороговых значений. Это 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 больше запросов.

С точки зрения средней длины очереди алгоритм гистерезисного управления уступает алгоритму IRED. Эти результаты представлены на рис. 2 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 ρ_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 ρ_0 почти линейно зависит от доли p разряженной нагрузки в состоянии сниженной нагрузки и слабо зависит от изменения верхнего порога при фиксированном нижнем. Аналогичная картина наблюдается и с другими значениями нижнего порога.

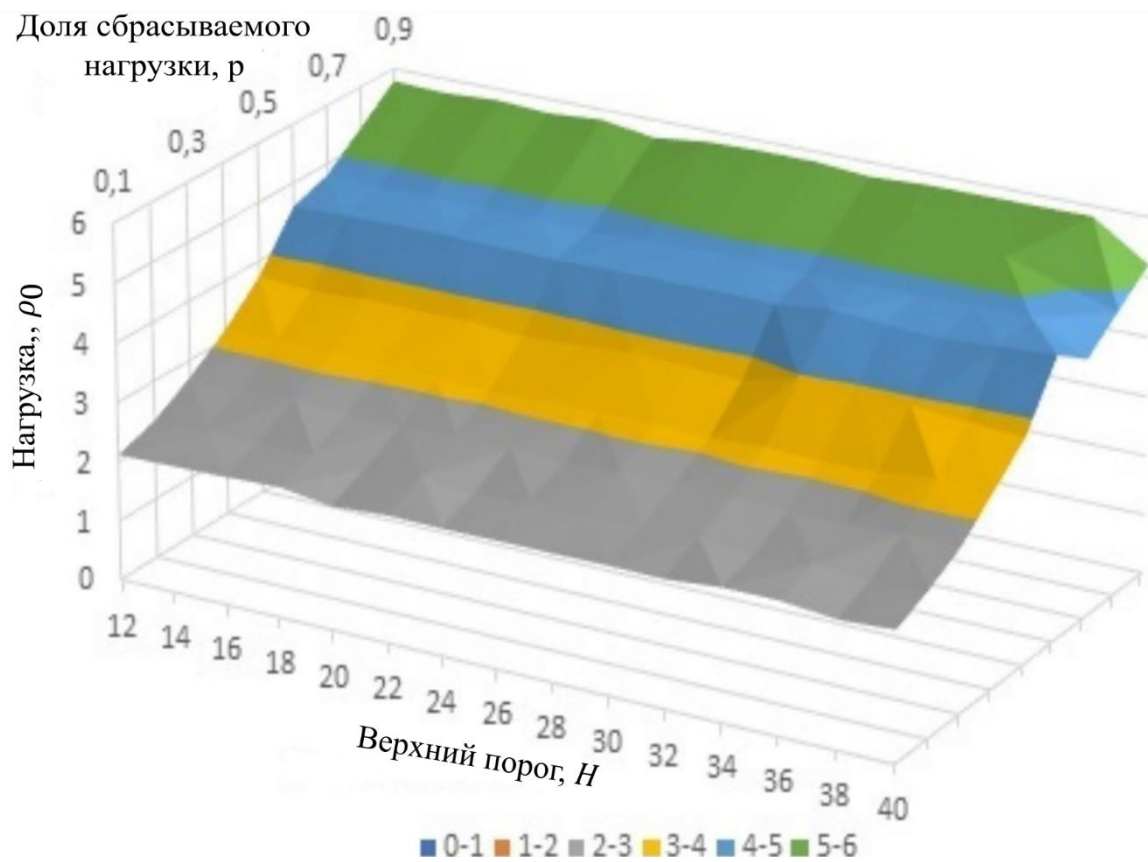


Рис. 2. Пороговое значение нагрузки

При написании разделов 2.1 – 2.3 использовались публикации [1,6] с участием автора.

Глава 3 посвящена закону распределения и расчету ВВХ времени пребывания Марковского процесса в пространстве состояний перегрузки в системе многопорогового управления.

В разделе 3.1 рассмотрен 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 беспилотных летательных аппаратах, патрулирующих поля по заданному курсу, как показано на рис. 3. патрулируемая область может быть разделена на две разные подобласти: 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.

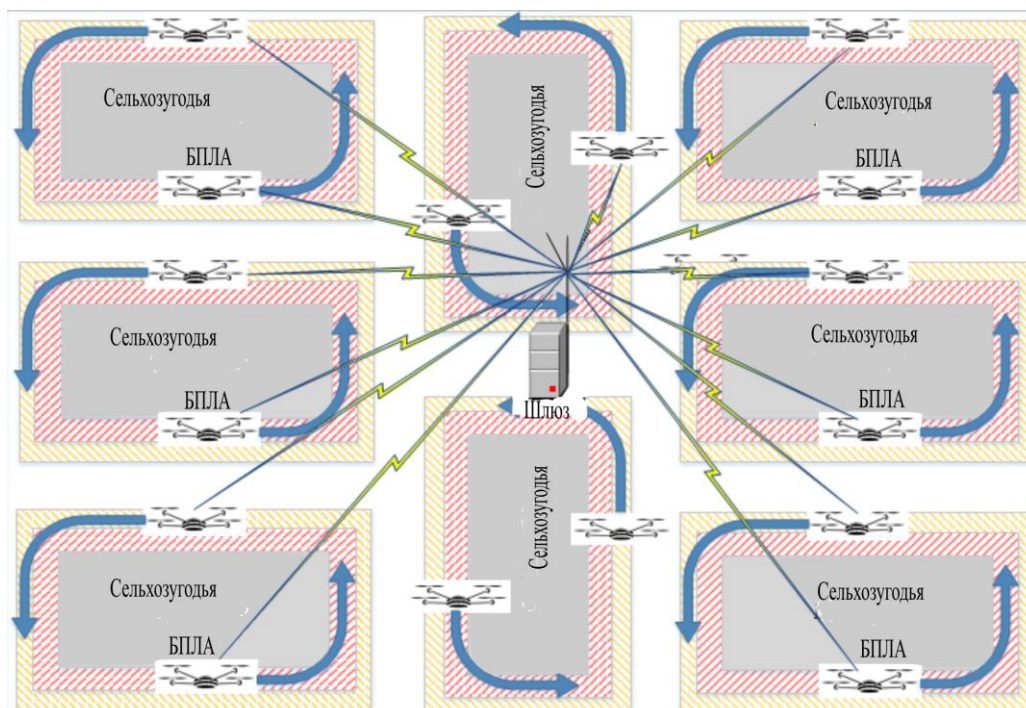


Рис. 3. Сценарий вторжения на ферму

Составлена модель массового обслуживания с одним сервером с экспоненциальной скоростью обслуживания μ и буфером размера K . Заявки

занимают буфер с момента их поступления в систему до момента их выхода из нее. Входящие потоки из желтой и красной областей (рис. 3) 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. 4.

Для управления нагрузкой в такой системе предложен механизм управления гистерезисом с четырьмя порогами: порог нормального состояния T_1 , порог сниженной нагрузки T_2 , порог предупреждения T_3 и порог перегрузки T_4 . Таким образом, система может находиться в любом из пяти состояний: нормальное состояние \mathcal{X}_0 ($s = 0$) состояние сниженной 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 общее количество заявок в системе n . Пространство состояний (14) может быть записано следующим образом:

$$\mathcal{X} = \{(n, s): 0 \leq n \leq K, s \in \{0, 1, 2, 3, 4\}\}, \quad (14)$$

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cup \mathcal{X}_1 \cup \mathcal{X}_2 \cup \mathcal{X}_3 \cup B, \quad (15)$$

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

$$T_{-1} = 0, T_5 = B = \{(n, s): n_1 + n_2 = K, s = 4\}. \quad (16)$$

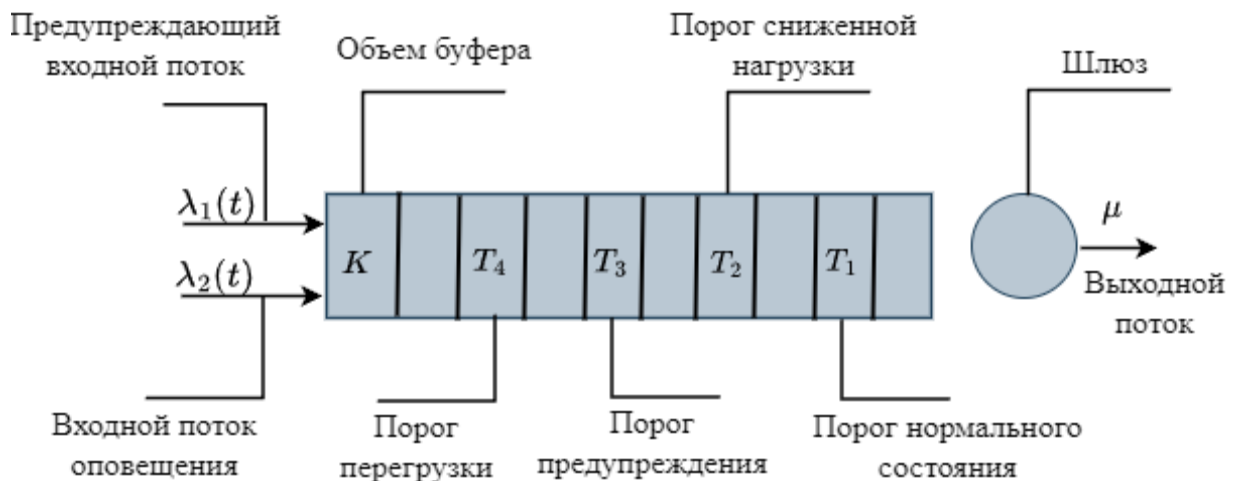


Рис. 4 Модель системы WSN с несколькими порогами

Суммарный входящий поток на систему в исходном нормальном состоянии \mathcal{X}_0 равен $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, однако, когда общее количество заявок в системе

достигает порогового значения T_2 , система переходит в состояние сниженной нагрузки \mathcal{X}_1 скорость поступления первого потока снижается до значения $\lambda_1^* = p_1 \lambda_1$ с параметром $0 \leq p_1 \leq 1$ в качестве вероятности принятия пакета первого типа. При этом периода второй поток остается прежним, поскольку он содержит более важную информацию и имеет больший приоритет.

После того, как система вошла в состояние сниженной нагрузки \mathcal{X}_1 , если общее количество заявок в системе уменьшается до порогового значения T_1 , скорость поступления первого потока возвращается к своему первоначальному значению, и система возвращается в нормальное состояние \mathcal{X}_0 . Однако, если вместо этого количество заявок 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 заявок в системе падает до T_2 , система возвращается в состояние сниженной нагрузки \mathcal{X}_1 и снова начинает принимать уменьшенный поток λ_1^* первого типа, одновременно принимая полный 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 заявок 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 заявка обрабатывается на сервере и в буфере появляется пустое пространство для размещения новой заявки, система возвращается в состояние

перегрузки \mathcal{X}_2 . Граф интенсивностей переходов для такой системы приведен на рис. 5.

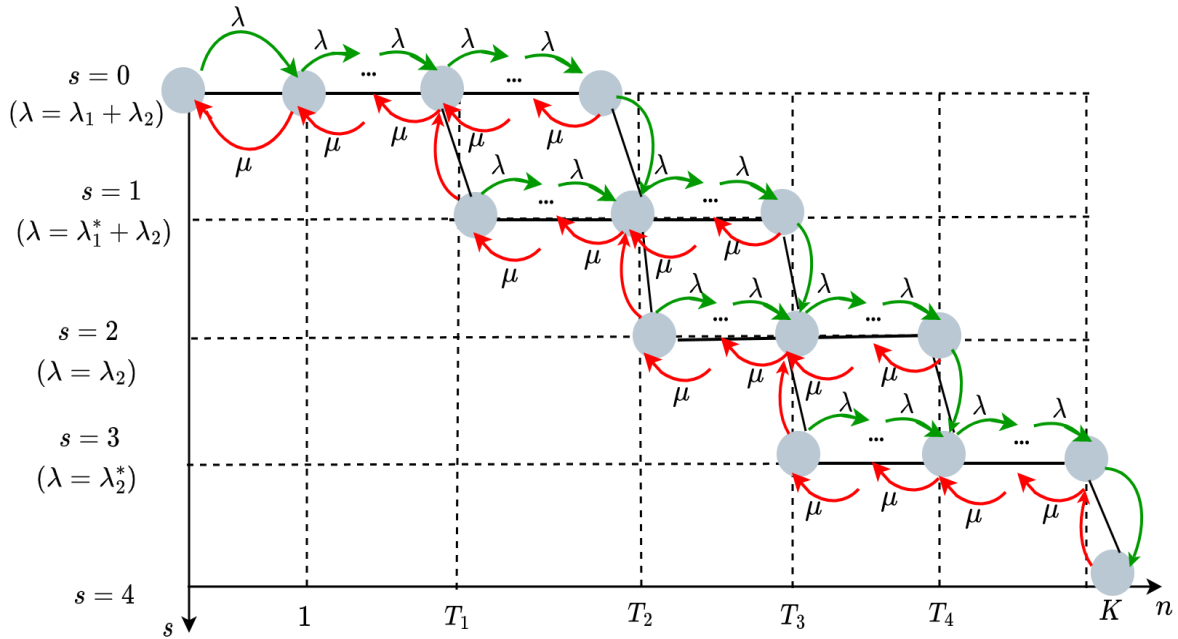


Рис. 5. Граф интенсивностей переходов МП $X(t)$

Раздел 3.2 представлен метод расчета времени, которое система проводит в подпространстве состояний. Здесь рассматриваются зависящие от времени характеристики системы, такие как среднее значение и дисперсия времени, которое система проводит в состоянии тревоги τ_3 , когда система отклоняет все заявки второго типа τ_2 , и среднее значение и дисперсия времени, которое система проводит в состоянии перегрузки, когда система отбрасывает часть заявок тревоги с низким приоритетом. Чтобы рассчитать эти характеристики, вводятся усеченные марковские процессы $X^{(i)}(t), i \in \{2,3\}$ с пространствами состояний

$$\mathcal{X}^{(2)} = \mathcal{X}_2 \cup \mathcal{X}_3 \cup \{T_2, 1\} \cup \{K, 4\}, \quad (17)$$

$$\mathcal{X}^{(3)} = \mathcal{X}_3 \cup \{T_3, 2\} \cup \{K, 4\}, \quad (18)$$

В обоих рассмотренных усеченных процессах существует только одно состояние входа в рассматриваемое подмножество состояний, что однозначно задает начальный вектор. Также в обоих случаях имеется единственное состояние выхода.

Для построенной модели получен общий вид матрицы интенсивностей переходов для процесса $X(t)$, а также показано, что матрица интенсивностей переходов для основного процесса, а также для усеченных процессов, показанных на рис. 6 может быть представлена в блочно-диагональном виде, согласно рис. 7.

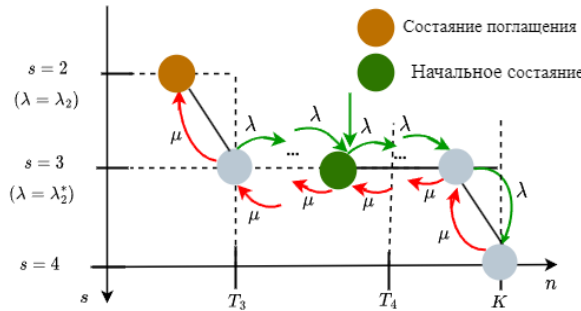


Рис. 6а Для МП $X^{(4)}(t)$

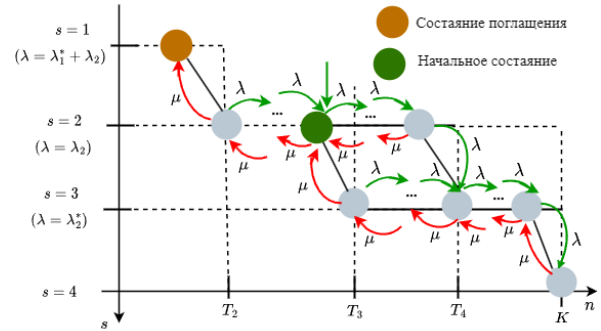


Рис. 6б Для МП $X^{(3)}(t)$

Рис. 6. Диаграммы интенсивностей переходов для усеченных марковских процессов

A	\mathcal{X}_0	\mathcal{X}_1	\mathcal{X}_2	\mathcal{X}_3	\mathcal{X}_4	K
\mathcal{X}_0	D	U	0	0	0	0
\mathcal{X}_1	L	D	U	0	0	0
\mathcal{X}_2	0	L	D	U	0	0
\mathcal{X}_3	0	0	L	D	U	0
\mathcal{X}_4	0	0	0	L	D	U
K	0	0	0	0	L	D

Рис. 7. Блочно-диагональный вид матрицы интенсивностей переходов МП $X(t)$

Здесь **D** - диагональные блоки, **L** - нижние диагональные блоки, описывающие обслуживание заявок на приборе и, как следствие, их уход из системы, и **U** - верхние диагональные блоки, описывающие поступление новых заявок в систему. Все элементы матрицы заполняются согласно следующему выражению:

$$A = a_{(n_1, s_1), (n_2, s_2)} =$$

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

Утверждение. Функция распределения времени $\tau_i, i = 3, 4$, может быть записана через переходные вероятности усеченных процессов следующим образом

$$F_{\tau_i} = p^{(i)}_{(\tau_i, i-1)}(t), i \in \{2, 3\}, \quad (19)$$

а его среднее значение и дисперсия могут быть получены в виде

$$E_{\tau_i} = \int_0^{\infty} t \left(\mu P_{(T_{i+1}-1, i), (T_i, i-1)}^{(i)}(t) - (p_2 \lambda_2 + \mu) P_{(T_{i+1}, i), (T_i, i-1)}^{(i)}(t) + p_2 \lambda_2 P_{(T_{i+1}+1, i), (T_i, i-1)}^{(i)}(t) \right) dt, i \in \{2, 3\}, \quad (20)$$

$$D_{\tau_i} = E(\tau_i^2) - E^2(\tau_i), i \in \{2, 3\}. \quad (21)$$

В разделе 3.3 представлен анализ модели управления гистерезисом с несколькими порогом. На рис. 8 показана функция распределения времени пребывания системы в состояниях тревоги τ_2 и перегрузки τ_3 при различной нагрузке. Можно заметить, что при низкой нагрузке $\rho = 3$ обе функции демонстрируют схожее поведение. Однако при высокой нагрузке системы $\rho = 3$,

функция распределения времени в состоянии перегрузки растет намного быстрее, чем ФР времени в состоянии тревоги. Это связано с тем, что при такой нагрузке система все еще может восстановиться из состояния перегрузки, поскольку благодаря механизму управления гистерезисом система не получает избыточной нагрузки, т.к. принимаемая системой нагрузка составляет только $p_2\lambda_2 = 0.96 < 1$.

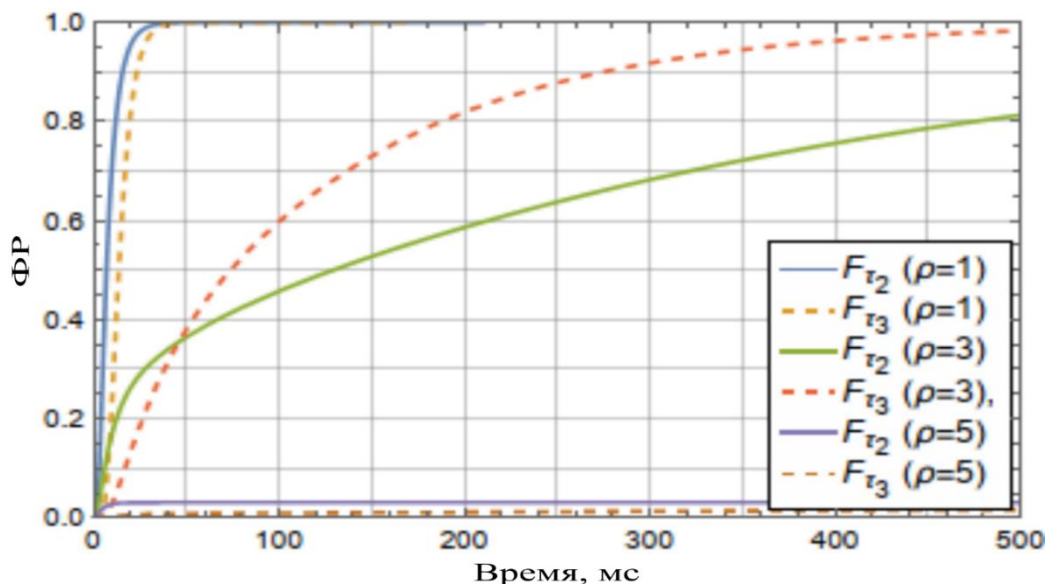


Рис. 8. ФР времени пребывания в состояниях тревоги и перегрузки при различной нагрузке системы

В то же время для состояния тревоги предложенная нагрузка равна $\lambda_2 = 1.2 > 1$, что приводит к тому, что сервер не может обслуживать заявки. Однако при дальнейшем увеличении нагрузки до $\rho = 5$, чтобы вернуться в состояние сниженной нагрузки, в результате чем больше времени проходит, тем меньше вероятность того, что система сможет выйти из состояния тревоги, 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.

При написании главы 3 использовалась публикация [5] с участием автора.

Основные результаты работы

В заключении диссертационной работы представлены основные результаты и выводы по полученным результатам.

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 Марковского процесса, 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 нестационарные вероятностно-временных характеристик системы – 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. B. Aliyu, M. Egor, and M. Evgeny. Queueing Model of Hysteretic Congestion Control for Cloud Wireless Sensor Networks. // 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) Brno, Czech Republic. IEEE. 2021. Pp. 104–108.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. А. Башир, Е. А. Мачнев, Е. В. Мокров. Гистерезисное управление нагрузкой в беспроводных сенсорных сетях. // Информатик и Её Применения, 2022. Т.16. Вып. 3. С. 83-89.
7. 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.

Алию Башир (Нигерия)

Моделирование и анализ процессов управления перегрузками в беспроводных распределенных сенсорных сетях

В диссертации представлены математические модели в виде систем массового обслуживания и алгоритм управления перегрузками на шлюзе для анализа показателей производительности распределенной сети WSN. Проведен сравнительный анализ между предложенной моделью порогового управления и алгоритмом IRED. Получена система уравнений равновесия для стационарного режима, а также методы расчета ключевых показателей эффективности системы – средней длины очереди, среднего времени обслуживания и вероятности блокировки для двух моделей.

В работе также разработана система многопорогового управления нагрузкой. Для данной модели получена система уравнений равновесия для нестационарного режима и в явном виде получена функция распределения времени пребывания системы в различных пространствах состояний.

Aliyu Bashir (Nigeria)

Modeling and analysis of congestion control processes in wireless distributed sensor networks

In this dissertation, mathematical models for analyzing performance measures of a WSN with congestion control framework in the form of a Queueing system was developed and implemented at the WSN gateway. Hysteresis congestion control model was proposed and a comparative analysis conducted between the proposed model and IRED algorithm. Systems of equilibrium equations and computational methods for calculating key performance indicators such as average queue length, average service time and blocking probability for the two models were developed.

The work also presents a system of multi-threshold Hysteretic load control. For this model, a system of equilibrium equations for a non-stationary state is obtained, and the distribution function of the systems sojourn time in various state spaces is explicitly obtained.