

На правах рукописи

БУЙ ЗУИ ТАН

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ СТОХАСТИЧЕСКОГО
ПОЛЛИНГА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
БЕСПРОВОДНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.13.15 —
«Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2020

Работа прошла апробацию на кафедре «Инфокоммуникационные системы и сети» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Вишневский Владимир Миронович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

Защита состоится 28.06.2021 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета ФРКТ 05.13.15.001 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета):

<https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhicheskie-nauki.php>.

Работа представлена «17» марта 2021 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Современные и перспективные протоколы широкополосных беспроводных компьютерных сетей предусматривают методы и алгоритмы по решению «проблемы скрытых станций». Указанная проблема возникает, когда абонентская станция (скрытая станция) по причине удаленности от базовой станции или наличия интерференции при прослушивании беспроводной среды не «видит» передачу/прием информации других станций сети, что приводит к возникновению коллизий и соответствующей потере производительности. Одним из эффективных алгоритмов борьбы с этим явлением является введение механизма поллинга – циклического опроса базовой станцией очередей пакетов абонентских станций. Примером реализации таких алгоритмов является протокол централизованного управления (координации) PCF – Point Coordination Function и его развитие – метод HCCA – Controlled Channel Access в стандарте IEEE 802.11-2016 а также протоколы перспективных сетей миллиметрового диапазона радиоволн (MM Wave), интернета вещей (IoT) и радиочастотной идентификации транспортных средств. Базовая станция играет важную роль, осуществляя централизованное управление доступом всех абонентских станций к среде передачи данных. Таким образом, все узлы беспроводной сети опрашиваются последовательно согласно порядку опроса или следуя определенному приоритету и получают право на обмен пакетов данных между узлами. Важно отметить, что такой механизм опроса позволяет избегать коллизий, организовать неконкурентный доступ к среде передачи данных и обеспечить приоритетный доступ. Однако разработка и производство сетевых устройств, поддерживающих централизованное управление, является достаточно дорогим и сложным. Но, несмотря на это, использование таких устройств позволяет эффективно задействовать самые ценные ресурсы широкополосной беспроводной компьютерной сети: частотный ресурс и ресурс пропускной способности. Централизованное управление правом доступа станций к среде передачи данных позволяет устранить проблему «скрытых станций», а также позволяет четко планировать порядок доступа станций, гибко управлять всей работой радиосоты и менять ее параметры в зависимости от конкретных условий, настраивая только базовую станцию и не затрагивая оконечных. Широкое практическое применение сетей этого класса определяет актуальность тематики предлагаемой диссертации, в рамках которой предполагается разработка новых моделей, методов и алгоритмов адаптивного стохастического поллинга, направленных на повышение производительности беспроводных компьютерных сетей с централизованным механизмом управления. Актуальным также является разработка пакета программ аналитического и имитационного моделирования, обеспечивающего проведение сравнительного численного анализа различных методов

опроса абонентских станций, повышение качества и ускорение процесса проектирования сетей рассматриваемого класса.

Степень разработанности темы. Исследованию протоколов централизованного управления на базе моделей стохастического поллинга посвящено значительное количество статей отечественных ученых: Вишневский В.М., Гайдамака Ю.В., Моисеев А.Н., Рыков В.В., Семёнова О.В., Сонькин М.А., и др. а также зарубежных ученых: О.Й. Боксма, С. Борст, У. Йехиали, Х. Такаги. В большинстве работ, в основном, были разработаны методы исследования систем циклического опроса, в частности, систем поллинга с исчерпывающей и шлюзовой дисциплиной. В данной работе рассматриваются слабоизученные в мировой литературе системы стохастического адаптивного поллинга, которые адекватно описывают принципы работы широкополосных беспроводных компьютерных сетей с централизованным управлением. Такая система была впервые описана в статье: V.M.Vishnevsky, O.V.Semenova, A.N. Dudin, V.I.Klimenok. Approximate Method to Study M/G/1-Type Polling System with Adaptive Polling Mechanism. Quality Technology & Quantitative Management (QTQM). 2012. Vol.9, № 2, pp.211-228., в которой предложен приближенный алгоритм расчета характеристик производительности систем поллинга с адаптивным опросом. В данном исследовании не только рассматривается задача анализа системы стохастического адаптивного поллинга для получения точных формул, но и имитационные модели других типов систем стохастического поллинга, которые до сих пор слабоизучены, например, системы циклического адаптивного поллинга типа MAP/PN/1 с шлюзовой и исчерпывающей дисциплиной и коррелированными входными потоками. Разработанный в диссертации пакет программ для расчета характеристик широкого класса моделей систем поллинга использован для проведения численного сравнительного анализа характеристик производительности беспроводных компьютерных сетей с централизованным механизмом управления.

Цели диссертационной работы. Целью диссертации является разработка и исследование новых методов повышения производительности широкополосных беспроводных компьютерных сетей с использованием моделей стохастического поллинга. Для реализации этой цели в рамках диссертации разработан комплекс новых моделей, методов и алгоритмов стохастических систем поллинга с динамическим адаптивным механизмом опроса очередей, включая:

- Анализ современного состояния исследований в области систем стохастического поллинга и их применения при проектировании широкополосных беспроводных компьютерных сетей.
- Разработка методов исследования стационарных характеристик систем адаптивного поллинга с использованием аппарата вложенных

марковских процессов, производящих функций и преобразований Лапласа-Стилтьеса.

- Сравнительный анализ различных схем адаптивного опроса и дисциплин обслуживания очередей (шлюзовая, исчерпывающая, случайная и т.д.) в системах стохастического поллинга.
- Разработка и исследование моделей стохастических систем динамического поллинга с коррелированными входными потоками и алгоритмов расчета их основных характеристик.
- Анализ чувствительности характеристик стохастических систем с динамическим адаптивным опросом к типу функции распределения времени обслуживания и коэффициента корреляции входных потоков.
- Разработка комплекса программ имитационного моделирования, учитывающего особенности протоколов беспроводных компьютерных сетей с централизованным управлением.
- Разработка архитектуры пакета прикладных программ оценки характеристик производительности широкополосных беспроводных компьютерных сетей с централизованным механизмом управления.
- Разработка программного комплекса исследования характеристик, моделей стохастического поллинга с использованием как известных различных методов опроса, так и разработанных в проекте методов динамического адаптивного опроса очередей пакетов.
- Проведение численного сравнительного анализа характеристик производительности беспроводных компьютерных сетей при различных режимах опроса абонентских станций с использованием разработанного пакета программ.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы теории вероятностей, теории массового обслуживания, вычислительной математики, случайных процессов, методы имитационного моделирования.

Научная новизна. Разрабатываемые в диссертации модели стохастических систем динамического поллинга и методы их исследования, учитывающие особенности адаптивных дисциплин опроса очередей, недостаточно изучены в мировой литературе. До настоящего времени для отдельных частных случаев таких моделей разработаны лишь приближенные алгоритмы расчета основных характеристик. В диссертационной работе разработан комплекс точных методов анализа систем поллинга с адаптивным порядком опроса, а также программные средства, реализующие теоретические результаты, полученные в диссертации. В диссертации разработаны:

- методы исследования стационарных характеристик систем адаптивного поллинга с использованием аппарата вложенных марковских процессов и производящих функций;

- проведен сравнительный анализ различных схем адаптивного опроса и дисциплин обслуживания очередей (шлюзовая, исчерпывающая, случайная и т.д.) в системах стохастического поллинга;
- разработаны и исследованы модели стохастических систем динамического поллинга с коррелированными входными потоками и алгоритмы расчета их основных характеристик;
- проведен анализ чувствительности характеристик стохастических систем с динамическим адаптивным опросом к типу функции распределения времени обслуживания и коэффициента корреляции входных потоков;
- разработан комплекс программ имитационного моделирования, учитывающий особенности протоколов беспроводных компьютерных сетей с централизованным управлением. IEEE 802.11, Интернета Вещей (IEEE 802.15.4) и т.д.

Несмотря на значительное количество теоретических и практических работ по системам поллинга, в мировой практике отсутствуют пакеты прикладных программ для численного исследования характеристик систем этого класса, что сужает применение моделей поллинга при проектировании различных систем, в том числе широкополосных беспроводных компьютерных сетей с централизованным механизмом управления. Разработанный в рамках диссертации пакет программ по расчету характеристик широкого класса моделей систем поллинга использован для проведения численного сравнительного анализа характеристик производительности беспроводных компьютерных сетей при различных режимах опроса абонентских станций.

Личный вклад. Все приведенные результаты исследований в данной диссертации, выполнены самым автором и под непосредственным руководством научного руководителя. Личный вклад автора заключается в разработке теоретических методов решения поставленных задач диссертации, а также разработке нового пакета программ для численного исследования разработанных в диссертации систем. Автор неоднократно докладывал результаты диссертационной работы на международных научных конференциях.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых моделей и методов математического анализа стохастического адаптивного поллинга с шлюзовой и исчерпывающей дисциплиной, а также сравнительном анализе различных механизмов опроса очередей абонентских станций.

Практическая значимость. Результаты данного исследования могут быть эффективно использованы для оценки характеристик широкополосных протоколов беспроводных компьютерных сетей и повышения их производительности за счет использования динамической адаптивной процедуры очередей пакетов в абонентских станциях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математический метод исследования систем адаптивного поллинга с шлюзовой и исчерпывающей дисциплиной опроса абонентских станций.
2. Алгоритм исследования систем динамического адаптивного поллинга с входными коррелированными потоками.
3. Анализ чувствительности характеристик стохастических систем с динамическим адаптивным опросом к типу функции распределения времени обслуживания и коэффициента корреляции входных потоков.
4. Пакет программ аналитического и имитационного моделирования, учитывающий особенности протоколов беспроводных компьютерных сетей с централизованным управлением.

Достоверность полученных результатов определяется корректными доказательствами полученных формул для вычисления характеристик производительности систем адаптивного поллинга, а также их сравнения с результатами имитационного моделирования.

Апробация работы. Основные результаты исследования по теме диссертации были доложены и обсуждены на следующих конференциях и совещаниях:

1. Международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети IEEE» (DCCN-2019, Москва).
2. Всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (ИТТММ-2019, Москва, РУДН).
3. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019, ИПУ РАН, Москва).
4. Международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети» (DCCN-2018, Москва).
5. 17th International Conference, ITMM 2018, Named After A.F. Terpugov, and 12th Workshop on Retrial Queues and Related Topics, WRQ 2018, Tomsk, Russia, 2018.
6. Всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (ИТТММ-2018, Москва, РУДН).

Результаты, полученные в диссертации, использованы при выполнении проекта Российского научного фонда № 16-49-02021 «Новый комплекс математических моделей, методов, алгоритмов и программ управляемых стохастических систем для оценки производительности и проектирования телекоммуникационных сетей следующего поколения» (2016-2018 г.).

Публикации. Основные результаты исследования по теме диссертации опубликованы в 11 печатных работах, 1 статьи из которых опубликованы в научных журналах, входящих в перечень ВАК, 3 статьи в научных изданиях, индексируемых системами Scopus и Web of Science, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ, 6 тезисов докладов.

Содержание работы

Во введении описана актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна работы, рассмотрена степень изученности темы в научной литературе, раскрыта теоретическая значимость и практическая ценность диссертации. Представлены выносимые на защиту основные научные положения, приведены сведения об апробации полученных результатов и публикациях по теме исследования.

Первая глава содержит описание протокола централизованного управления доступом к среде абонентских станций, классификацию основных моделей систем поллинга, методов оценки широкополосных беспроводных компьютерных сетей, области применения систем опроса в различных областях, в том числе в широкополосных беспроводных компьютерных сетях связи, приведен обзор работ по системам поллинга и сформулированы задачи исследования диссертации.

В разделе 1.1 приведено подробное описание протокола централизованного управления доступом к среде абонентских станций.

Протокол централизованного управления PCF и его развитие метод НССА предполагает наличие точки доступа (сервера), определяющей какая станция в настоящее время имеет право передавать данные. По сути, это есть система циклического опроса с сервером, который выполняет роль мастера опроса. Схема, представленная на рисунке 1, иллюстрирует реализацию режима централизованного опроса. Точка доступа (AP – Access



Рисунок 1 — Режим функции централизованной координации PCF

point) пересылает кадры с данными (DATA), предназначенные станциями сети (если они есть), а также опрашивает все узлы сети о кадрах, которые стоят в их очередях на передачу, посылая им служебные кадры опроса CF-POLL (приглашение к передаче). Опрос станций сети точка доступа ведет согласно списку опроса, хранящемуся на ней. Способы формирования и поддержания списка опроса не регламентируются стандартом IEEE 802.11-2016, поэтому разработчики устройств беспроводных компьютерных сетей имеют полную свободу в способах реализации этого списка. Если способ формирования и поддержания списка опроса — циклический опрос, то осуществляются следующие шаги:

- Шаг 0: AP отправляет Beacon (сигнал широковещательного идентификатора сети) сразу после PIFS (PCF Interframe Space – PCF межкадровый интервал). Это сообщение достигает каждой станции (устройства WLAN) без какого-либо риска коллизии. Beacon несет информацию о возможностях начала режима PCF.
- Шаг 1: После SIFS (Short Interframe Space – короткий межкадровый интервал) AP начинает опрашивать первую станцию, посылая CF-POLL (кадр опроса) и передает данные (DATA) первой станции, если AP имеет данные для первой станции. После SIFS, первая станция передает свои данные и CF-ACK (кадр подтверждения) на AP (при пустой очереди станция отвечает так называемым нулевым кадром NULL, состоящим только из заголовка и CF-ACK).
- Шаг 2: После SIFS сервер начинает опрашивать вторую станцию, посылая CF-POLL + CF-ACK и передает данные второй станции если AP имеет данные для второй станции. После SIFS, вторая станция передает свои данные (если они имеются) и CF-ACK на AP.
- Шаг 3: После SIFS сервер начинает опрашивать третью станцию, посылая CF-POLL + CF-ACK и передает данные третьей станции, если AP имеет данные для третьей станции. После SIFS, если третья станция не отвечает, AP ожидает один интервал времени (один интервал времени это есть Slot time a PIFS = Slot time + SIFS) и начинает опрашивать следующую станцию, и так далее. После того, как AP получил данные и CF-ACK от последней станции, AP ожидает SIFS и передает всем кадр CF-END и сообщает об окончании режима PCF. Если способ формирования и поддержания списка опроса – адаптивный динамический опрос, то AP не опрашивает те станции, которые были пусты в прошлом цикле опроса.

Для уменьшения накладных расходов точка доступа может совмещать кадр опроса с передачей данных (кадр DATA + CF-POLL). Аналогично станции сети могут совмещать кадры подтверждения с передачей данных DATA+CF-ACK. Допускаются следующие типы кадров во время режима PCF: DATA – кадр данных, CF-ACK – кадр подтверждения,

CF-POLL – кадр опроса, DATA+CF-ACK – комбинированный кадр данных и подтверждения, DATA+CF-POLL – комбинированный кадр данных и опроса, DATA+CF-ACK+CF-POLL – комбинированный кадр данных, подтверждения и опроса, CF-ACK+CF-POLL – комбинированный кадр подтверждения и опроса.

В разделе 1.2 описаны: основная модель системы поллинга, методы оценки широкополосных беспроводных компьютерных сетей и основные применения систем поллинга в разных областях, а также в широкополосных беспроводных компьютерных сетях связи.

В разделе 1.3 приведен обзор работ по системам поллинга.

В разделе 1.4 сформулированы основные задачи исследования диссертации.

Вторая глава посвящена обзору основных методов исследования систем стохастического поллинга, также в ней исследована система с адаптивным динамическим опросом с шлюзовой и исчерпывающей дисциплиной обслуживания очередей пакетов в абонентских станциях с помощью метода производящих функций и разработана имитационная модель системы с адаптивным динамическим опросом с коррелированными входными потоками.

В разделе 2.1 приведен обзор существующих методов исследования систем стохастического поллинга.

В разделе 2.2 рассматривается система адаптивного динамического поллинга с шлюзовой дисциплиной.

Рассмотрена система поллинга с N очередями типа $M/G/1$ и шлюзовым обслуживанием очередей. В i -ю очередь (обозначим ее через Q_i) поступает простейший поток заявок с параметром λ_i . Время обслуживания заявки в этой очереди имеет функцию распределения $B_i(t)$ с первым и вторым начальными моментами b_i и $b_i^{(2)}$, а также преобразование Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) $\tilde{B}_i(s) = \int_0^\infty e^{-st} dB_i(t)$. Время подключения сервера к очереди Q_i имеет функцию распределения $S_i(t)$ с первым и вторым моментами s_i и $s_i^{(2)}$ и ПЛС $\tilde{S}_i(s)$, $i = \overline{1, N}$. При адаптивном порядке опроса сервер опрашивает очереди циклически, но пропускает (не опрашивает) в цикле те из них, которые были опрошены сервером в предыдущем цикле и при этом оказались пусты в момент их опроса. Все очереди, которые пропускает сервер в данном цикле, будут опрошены в следующем цикле. Предполагаем, что в случае, когда сервер опрашивает N очередей подряд и все они оказываются пустыми (отсчет может вестись с любой очереди), он останавливается и берет отдых, имеющий функцию распределения $H(t)$ с первым и вторым моментами β и $\beta^{(2)}$ и ПЛС $\tilde{H}(s)$. По завершении отдыха сервер начинает опрос следующей очереди, и процедура опроса повторяется вновь. Дисциплина обслуживания очереди предполагается шлюзовой, то есть сервер обслуживает в очереди лишь те заявки, которые находились в ней в момент ее опроса.

Условие существования стационарного режима для данной системы имеет вид $\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i < 1$, где $\rho_i = \lambda_i b_i$ – загрузка очереди Q_i . Предположим, что это неравенство выполнено.

Под временем цикла будем понимать время, которое затрачивает сервер на опрос очередей с Q_1 по Q_N , включая возможное время отдыха. Среднее время цикла задается формулой

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N s_i u_i + \beta \prod_{i=1}^N (1 - u_i)}{1 - \rho}, \quad (1)$$

где u_i – это вероятность того, что в произвольном цикле очередь Q_i будет опрошена. Эта вероятность вычисляется следующим образом:

$$u_i = \frac{1}{1 + e^{-\lambda_i C}}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Равенства (1)–(2) задают систему уравнений для вычисления среднего времени цикла и вероятностей u_i , $i = \overline{1, N}$.

Обозначим через X_i^j среднее число заявок, находящихся в очереди Q_j в момент опроса сервером очереди Q_i , $i, j = \overline{1, N}$. Пусть также $A_i(T)$ есть число заявок из входящего в очередь Q_i потока, поступивших в течение случайного времени длительности T , B_{ik} – время обслуживания k -й заявки в очереди Q_i , S_i – время подключения сервера к очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$, а H – это длительность отдыха сервера. При шлюзовом обслуживании изменение состояний системы в указанные моменты времени (при условии событий $M_{i+1}^{(j)}$) происходит следующим образом:

$$X_{i+1}^j \Big| M_{i+1}^{(n)} = \begin{cases} X_i^j + A_j \left(\sum_{k=1}^{X_i^i} B_{i,k} + S_{i+1} + I_{\{n=N\}} H \right), & i - n \neq j, \\ A_j \left(\sum_{k=1}^{X_i^i} B_{i,k} + S_{i+1} + I_{\{n=N\}} H \right), & i - n = j, \end{cases} \quad (3)$$

для всех $n = \overline{0, N}$, где $M_{i+1}^{(j)}$ – это событие, состоящее в том, что сервер пропускает ровно j очередей перед опросом очереди Q_{i+1} , т.е. предыдущая очередь, которую опрашивал сервер, была Q_{i-j} , если $i > j$, и Q_{i-j+N} , если $i \leq j$, $j = \overline{0, N}$. При $i - k < 0$ мы предполагаем, что $X_{i-k}^j = X_{i-k+N}^j$. $I_{\{A\}}$ – это функция-индикатор выражения A . $I_{\{A\}} = 1$, если A верно, и $I_{\{A\}} = 0$ в противном случае.

При фиксированном i вероятности событий $M_{i+1}^{(j)}$, $j = \overline{0, N}$ вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}\{M_{i+1}^{(0)}\} &= u_i, \quad \mathbf{P}\{M_{i+1}^{(1)}\} = (1 - u_i)u_{i-1}, \dots, \\
\mathbf{P}\{M_{i+1}^{(i-1)}\} &= (1 - u_i)(1 - u_{i-1}) \cdots (1 - u_2)u_1, \\
\mathbf{P}\{M_{i+1}^{(i)}\} &= \prod_{k=1}^i (1 - u_k)u_N, \\
\mathbf{P}\{M_{i+1}^{(i+1)}\} &= \prod_{k=1}^i (1 - u_k)(1 - u_N)u_{N-1}, \dots \\
\mathbf{P}\{M_{i+1}^{(N)}\} &= \prod_{k=1}^i (1 - u_k)(1 - u_N) \cdots (1 - u_{i-1}) = \prod_{k=1}^N (1 - u_k).
\end{aligned} \tag{4}$$

Нетрудно убедиться, что события $M_{i+1}^{(j)}$, $j = \overline{0, N}$ составляют полную группу, т.е. $\sum_{j=0}^N \mathbf{P}\{M_{i+1}^{(j)}\} = 1$. Производящие функции числа заявок в очередях систем в моменты опроса имеют вид

$$G_i(\mathbf{z}) = \mathbf{M} \left[\prod_{j=1}^N z_j^{X_i^j} \right], \quad i = \overline{1, N},$$

где $\mathbf{M}$ — это математическое ожидание. С помощью соотношения (3) получаем

$$\begin{aligned}
F_i(\mathbf{z}) &= u_i \mathbf{M} \left[\prod_{j=1}^N z_j^{X_{i+1}^j} \middle| M_{i+1}^{(0)} \right] + (1 - u_i)u_{i-1} \mathbf{M} \left[\prod_{j=1}^N z_j^{X_{i+1}^j} \middle| M_{i+1}^{(1)} \right] + \dots + \\
&\quad + (1 - u_1) \cdots (1 - u_N) \mathbf{M} \left[\prod_{j=1}^N z_j^{X_{i+1}^j} \middle| M_{i+1}^{(N)} \right] = \\
&= u_i \mathbf{M}_{i+1}^{(0)}(\mathbf{z}) + (1 - u_i)u_{i-1} \mathbf{M}_{i+1}^{(1)}(\mathbf{z}) + \dots + (1 - u_1) \cdots (1 - u_{N-1})u_N \mathbf{M}_{i+1}^{(N-1)}(\mathbf{z}) + \\
&\quad + (1 - u_1) \cdots (1 - u_N) \mathbf{M}_{i+1}^{(N)}(\mathbf{z}), \quad (5)
\end{aligned}$$

где $u_{i-N} = u_i$, $F_{i-N}(\mathbf{z}) = F_i(\mathbf{z})$, $\mathbf{M}_{i+1}^{(l)}(\mathbf{z}) = \mathbf{M} \left[\prod_{j=1}^N z_j^{X_{i+1}^j} \middle| M_{i+1}^{(l)} \right]$, $l = \overline{0, N}$.

Найдем далее математическое ожидание случайной величины $z_j^{A_j(T)}$, где T – это случайная величина с функцией распределения $D(T)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \left[z_j^{A_j(T)} \right] &= \int_0^\infty \mathbf{M} \left[z_j^{A_j(T)} \right] dD(t) = \int_0^\infty \sum_{k=0}^\infty P(A_j(t) = k) z_j^k dD(t) = \\ &= \int_0^\infty \sum_0^\infty \frac{(\lambda_j t)^k}{k!} e^{-\lambda_j t} z_j^k dD(t) = \int_0^\infty e^{-\lambda_j t(1-z_j)} dD(t) = \tilde{D}(\lambda_j(1-\lambda_j)), \end{aligned}$$

а $\tilde{D}(w)$ – это ПЛС функции распределения $D(t)$. Далее имеем

$$\mathbf{M} \left[z_j^{A_j(T)} \right] = \tilde{D} \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j(1-\lambda_j) \right). \quad (6)$$

С помощью формул (4) и (6), получаем функции $\mathbf{M}_{i+1}^{(l)}(\mathbf{z})$, $l = \overline{0, N}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{i+1}^{(l)}(\mathbf{z}) &= F_{i-l} \left(z_1, z_2, \dots, z_{i-l}, \tilde{B}_{i-l} \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j(1-z_j) \right), z_{i-l+2}, \dots, z_N \right) \times \\ &\quad \times \tilde{S}_{i-l+1} \left[\sum_{j=1}^N \lambda_j(1-z_j) \right], \quad l = \overline{0, N-1}, \\ \mathbf{M}_{i+1}^{(N)}(\mathbf{z}) &= F_{i-N} \left(z_1, z_2, \dots, z_{i-N}, \tilde{B}_{i-N} \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j(1-z_j) \right), z_{i-N+2}, \dots, z_N \right) \times \\ &\quad \times \tilde{S}_{i-N+1} \left[\sum_{j=1}^N \lambda_j(1-z_j) \right] \tilde{H} \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j(1-z_j) \right). \quad (7) \end{aligned}$$

Среднее число заявок $f_i(j) = \mathbf{M}[X_i^j]$ в очереди Q_j в момент опроса очереди Q_i определяется как

$$f_i(j) = \mathbf{M} \left[X_i^j \right] = \left. \frac{\partial F_i(\mathbf{z})}{\partial z_j} \right|_{\mathbf{z}=\mathbf{1}},$$

где $\mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)$.

Дифференцируя равенства (5) с учетом (7) получаем следующую систему линейных алгебраически уравнений для $f_i(j)$, $i, j = \overline{1, N}$:

$$\begin{aligned} f_{i+1}(j) &= u_i \left[I_{\{i=j\}} f_i(j) + \lambda_j b_i f_i(i) + \lambda_j s_{i+1} \right] + \\ &\quad + (1-u_i) u_{i-1} \left[I_{\{i-1=j\}} f_{i-1}(j) + \lambda_j b_{i-1} f_{i-1}(i-1) + \lambda_j s_{i+1} \right] + \dots + \\ &\quad + (1-u_1) \dots (1-u_N) \left[I_{\{i-N=j\}} f_{i-N}(j) + \lambda_j b_{i-N} f_{i-N}(i-N) + \lambda_j (s_{i+1} + \beta) \right]. \end{aligned}$$

Моменты второго порядка случайных величин $X_i^j, i, j = \overline{1, N}$ вычисляются следующим образом:

$$f_i(j, k) = \mathbf{M} [X_i^j X_i^k] = \left. \frac{\partial^2 F_i(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} \right|_{\mathbf{z}=\mathbf{1}}, \quad f_i(i, i) = \mathbf{M} [X_i^i (X_i^i - 1)] = \left. \frac{\partial^2 F_i(\mathbf{z})}{\partial z_j^2} \right|_{\mathbf{z}=\mathbf{1}}.$$

Дифференцируя (5), получаем

$$f_{i+1}(j, k) = \left[u_i \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(0)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} + (1 - u_i) u_{i-1} \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(1)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} + \dots + \right. \\ \left. + (1 - u_1) \dots (1 - u_N) \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(N)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} \right] \Big|_{\mathbf{z}=\mathbf{1}}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(l)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k}$, $l = \overline{0, N}$ вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(0)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} &= \lambda_j \lambda_k s_{i+1}^{(2)} + s_{i+1} \lambda_k f_i(j) + s_{i+1} \lambda_j f_i(k) + f_i(i) \lambda_j \lambda_k [2b_i s_{i+1} + b_i^{(2)}] + \\ &+ f_i(i, i) \lambda_j \lambda_k b_i^2 + f_i(i, j) b_i \lambda_k + f_i(i, k) b_i \lambda_j + f_i(j, k), \quad i \neq j, i \neq k, \\ \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(0)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} &= \lambda_i \lambda_j s_{i+1}^{(2)} + s_{i+1} \lambda_i f_i(j) + f_i(i) \lambda_i \lambda_j [2b_i s_{i+1} + b_i^{(2)}] + f_i(i, j) b_i \lambda_i + \\ &+ \lambda_i \lambda_j b_i^2 f_i(i, i), \quad i \neq j, \\ \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(0)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} &= \lambda_i^2 s_{i+1}^{(2)} + f_i(i) \lambda_i^2 [2b_i s_{i+1} + b_i^{(2)}] + \lambda_i^2 b_i^2 f_i(i, i), \quad i, j, k = \overline{1, N}, \\ &\dots \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(N)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} &= \lambda_j \lambda_k (s_{i+1}^{(2)} + \beta^{(2)}) + (s_{i+1} + \beta) \lambda_k f_i(j) + (s_{i+1} + \beta) \lambda_j f_i(k) + \\ &+ f_i(i) \lambda_j \lambda_k [2b_i (s_{i+1} + \beta) + b_i^{(2)}] + f_i(i, i) \lambda_j \lambda_k b_i^2 + f_i(i, j) b_i \lambda_k + \\ &+ f_i(i, k) b_i \lambda_j + f_i(j, k), \quad i \neq j, i \neq k, \\ \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(N)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} &= \lambda_i \lambda_j (s_{i+1}^{(2)} + \beta^{(2)}) + (s_{i+1} + \beta) \lambda_i f_i(j) + f_i(i, j) b_i \lambda_i + \\ &+ f_i(i) \lambda_i \lambda_j [2b_i (s_{i+1} + \beta) + b_i^{(2)}] + \lambda_i \lambda_j b_i^2 f_i(i, i), \quad i \neq j, \\ \frac{\partial^2 \mathbf{M}_{i+1}^{(N)}(\mathbf{z})}{\partial z_j \partial z_k} &= \lambda_i^2 (s_{i+1}^{(2)} + \beta^{(2)}) + f_i(i) \lambda_i^2 [2b_i (s_{i+1} + \beta) + b_i^{(2)}] + \lambda_i^2 b_i^2 f_i(i, i), \quad i, j, k = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Соотношения (8)–(9) определяют систему линейных алгебраических уравнений для вычисления моментов второго порядка $f_i(j, k)$, $i, j, k = \overline{1, N}$, которые позволяют вычислить среднее время ожидания W_i в очереди Q_i по следующей формуле:

$$W_i = \frac{f_i(i, i) - f_i}{2\lambda_i f_i} (1 + \rho_i), i = \overline{1, N}. \quad (10)$$

В разделе 2.3 рассматривается система адаптивного динамического поллинга с исчерпывающей дисциплиной – сервер обслуживает заявки до момента, когда очередь станет пустой.

Обозначим через X_i^j число заявок в очереди Q_j в произвольный момент опроса очереди Q_i , $i, j = \overline{1, N}$, $A_i(T)$ – число заявок, поступивших в Q_i за время T , $\Theta_{i, k}$ – длительность периода занятости сервера в очереди Q_i , порожденного k -й заявкой, H – длительность отдыха сервера. Величины $\Theta_{i, k}$ независимы и одинаково распределены с ПЛС функции распределения $\tilde{\theta}_i(w)$, которое находится как решение функционального уравнения $\tilde{\theta}_i(w) = \tilde{B}_i(w + \lambda_i - \lambda_i \tilde{\theta}_i(w))$. Средняя длительность периода занятости сервера в i -й очереди определяется как $\theta_i = -\tilde{\theta}'(0) = \frac{b_i}{1 - \rho_i}$.

Дальнейший анализ системы проводится аналогично случаю шлюзовой дисциплины в разделе 2.2, а среднее время ожидания W_i в очереди Q_i вычисляется по следующей формуле:

$$W_i = \frac{\lambda_i b_i^{(2)}}{2(1 - \rho_i)} + \frac{f_i(i, i)}{2\lambda_i f_i(i)}, i = \overline{1, N}. \quad (11)$$

В разделе 2.4 разработан метод имитационного моделирования для исследования характеристик производительности систем адаптивного динамического поллинга с коррелированными входящими потоками типа MAP (Markovian Arrival Process, Марковский входной поток).

В третьей главе проводится описание архитектуры пакета прикладных программ (см. рисунок 2), состоящего из модуля расчета характеристик систем поллинга, полученных в диссертации и программно реализованных с использованием языка программирования Matlab, а также модуля имитационного моделирования, реализованного на базе пакета OMNeT++. Модуль имитационного моделирования включает модели систем, для которых не удается получить точные формулы расчета характеристик производительности, в том числе слабоизученных в настоящее время систем поллинга с коррелированными входными потоками. Оба модуля объединены в программный комплекс, для которого получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В разделе 3.1 приведено описание архитектуры пакета прикладных программ для оценки характеристик систем стохастического поллинга.

В разделе 3.2 приведено описание модуля, включающего комплекс программ расчета характеристик широкого класса систем поллинга

с использованием оригинальных аналитических результатов (формул и алгоритмов), полученных как в диссертационной работе, так и в опубликованных работах других авторов (см. рисунок 2), в частности, систем



Рисунок 2 — Схема пакета прикладных программ

адаптивного динамического поллинга с шлюзовой и исчерпывающей дисциплиной, формулы для которых получены в диссертации а также системы циклического поллинга с глобально-шлюзовой дисциплиной. В модуль включены программы для расчёта характеристик производительности следующих систем:

- Системы адаптивного динамического поллинга с шлюзовой дисциплиной.
- Системы адаптивного динамического поллинга с исчерпывающей дисциплиной.
- Системы циклического поллинга с шлюзовой дисциплиной.
- Системы циклического поллинга с исчерпывающей дисциплиной.
- Системы циклического поллинга с глобально-шлюзовой дисциплиной.

Эти программы позволяют получить следующие характеристики:

- Вероятность опроса каждой очереди в системе адаптивного опроса;

- Вероятность того, что сервер опрашивал i -очередь и переходит в $(i + k)$ -очередь, где $k = \overline{1, N}$, в системе адаптивного опроса;
- Первые и вторые моменты длины каждой очереди в произвольный момент опроса очередей сервером;
- Среднее время цикла для каждой очереди;
- Среднее время пребывания заявок в системе адаптивного динамического поллинга с исчерпывающей дисциплиной и шлюзовой дисциплиной.

Все программы модуля реализованы на языке программирования Matlab.

В разделе 3.3 приведено описание модуля имитационного моделирования на базе программного пакета OMNeT++, состоящего из трёх основных типов файлов: входные файлы, выходные файлы, файлы алгоритмов. Данный модуль включает имитационные модели следующих систем поллинга (см. рисунок 2): систем поллинга с циклическим, случайным и адаптивным динамическим опросом очередей с различными дисциплинами обслуживания очередей: шлюзовой, исчерпывающей, глобально-шлюзовой, k -ограниченной, T -ограниченной, пороговой и случайной. Рассмотрен также адаптивный упорядоченный динамический порядок опроса, при которой в первом цикле всем очередям присваивается ранг $r_i = 0, i = \overline{1, n}$. Если при опросе очереди i она пуста, то ее ранг уменьшается на 1, т.е. $r_i = -1$. В противном случае ранг этой очереди увеличивается на 1, т.е. $r_i = 1$. В следующем цикле сервер опрашивает очереди по порядку убывания их рангов. Если несколько очередей имеют одинаковый ранг, то сервер опрашивает эти очереди в порядке возрастания их номеров. Минимальное значение ранга равно -1 , и если ранг очереди достиг этого значения, то в следующем цикле сервер пропускает эту очередь и увеличивает ранг на 1. Входной поток может быть простейшим, потоком фазового типа или коррелированным MAP-поток. Для пакета имитационного моделирования, был использован OMNeT++ Discrete Event Simulator так же "OMNeT++ Simulation Manual Version 4.6". OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed на C++) - это модульная, основанная на компонентах библиотека моделирования и C++, в основном для создания сетевых симуляторов.

Механизм работы модуля имитационного моделирования представлен на рисунке 3. После определения входных данных (см. таблицу 1) и запуска программы, для каждой очереди генерируется длительность интервала времени, через которое поступит следующая заявка, а также время, в течение которого она будет обслуживаться. Заявки таким образом поступают и накапливаются в очереди. Сервер опрашивает очереди согласно таблице опроса и обслуживает их согласно выбранной дисциплине обслуживания очереди. После обслуживания очереди сервер определяет следующую очередь для опроса и переключается к ней в течение случайного времени, распределенного по экспоненциальному закону. Заявки,

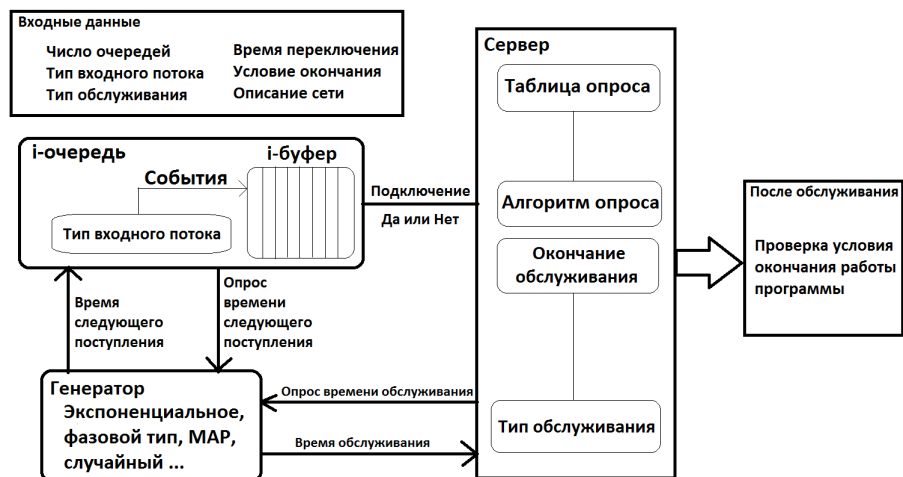


Рисунок 3 — Механизм работы модуля имитационного моделирования

Таблица 1 — Пример входных и выходных данных

Вход	Выход
1. *.numQueues = 2: Задание количества очередей. 2. *.generator[0].interArrivalTime = exponential(1/30): Задание интенсивности поступления заявок для первой очереди. 3. *.generator[1].interArrivalTime = exponential(1/30): Задание интенсивности поступления заявок для второй очереди. 4. *.**_gated_queue[*].serviceTime = exponential(0.01): Задание интенсивности обслуживания заявок для всех очередей. 5. **.switching_time = "0.001 0.002": Задание интенсивности переключения между очередями.	1. Delay time in Queues i : Среднее время пребывания заявок в очереди i. 2. InterVisittime in Queues i: Среднее время между последующими посещениями очереди i. 3. Number of cycle in Queues i: Количество циклов в этой очереди. 4. Cycle_time: Среднее время цикла. 5. Ave_delay: Среднее время пребывания заявок для всех очередей. 6. Number_of_packet: Количество сгенерированных пакетов. 7. График флуктуации среднего времени всех очередей.

завершившие своё обслуживание, учитываются модулем *Sink*, который вычисляет их время пребывания и проверяет условие остановки моделирования.

В разделе 3.4 Подробно описаны программы исследования характеристик систем стохастического поллинга с коррелированным входным

потоком типа МАР с некоторыми распределениями времени обслуживания (экспоненциальное, детерминированное, МАР и фазовое – РН).

В четвёртой главе проводится численный расчет характеристик систем стохастического поллинга с различными дисциплинами обслуживания. Исследована чувствительность характеристик систем с динамическим адаптивным опросом к типу функции распределения времени обслуживания и коэффициента корреляции входных потоков. Проведён сравнительный численный анализ характеристик производительности беспроводной компьютерной сети для двух механизмов опроса (адаптивного и традиционного циклического) с использованием программного комплекса исследования систем поллинга, описанного в главе 3.

В разделе 4.1 проведен численный расчет характеристик системы с динамическим адаптивным опросом и шлюзовым или исчерпывающим обслуживанием с использованием программного комплекса исследования систем поллинга.

Пусть система имеет 6 очередей типа $M/M/1$. Параметр обслуживания $\mu = 10000$. Первые три очереди (1 – 3) имеют постоянную интенсивность поступления заявок $\lambda = 1000$, а интенсивность входных потоков заявок в остальные очереди (4 – 6) меняется от 1 до 1500. Время переключения между очередями экспоненциально распределено с параметром $s = 1000$. Число мест для ожидания в очередях не ограничено. Рассмотрим время пребывания заявок V в следующих системах поллинга с исчерпывающей и шлюзовой дисциплиной: адаптивный динамический поллинг, упорядоченный адаптивный динамический поллинг и циклический поллинг. Величина V рассчитывается по формуле

$$V = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\rho} V_i,$$

среднее время пребывания заявок в системе, получаемое как сумма средних времен пребывания в очередях $V_i = W_i + \frac{1}{\mu_i}$, $i = \overline{1, N}$, взвешенных с соответствующими долями загрузки очередей $\frac{\rho_i}{\rho}$.

Численный расчет показал, что при любом рассмотренном порядке опроса среднее время пребывания заявок в системе с исчерпывающей дисциплиной меньше, чем среднее время пребывания заявок в системе с шлюзовой дисциплиной. При этом, увеличение интенсивности входного потока увеличивает разницу в значениях среднего времени пребывания.

Далее сравним среднее время пребывания при различных порядках опроса. В случае шлюзового обслуживания очередей величина V в системе с адаптивным циклическим опросом меньше на 12,3% по сравнению с обычным циклическим опросом, если некоторые очереди системы имеют малую загрузку в сравнении с остальными очередями системы. Преимущество взвешенного среднего времени пребывания в системе с упорядоченным

адаптивным опросом по сравнению с адаптивным опросом составляет 3,5% для аналогичной системы и 10,4% — по сравнению с системой с обычным циклическим опросом.

В случае исчерпывающей дисциплины обслуживания среднее время пребывания в системе с адаптивным циклическим опросом меньше на 27,8% по сравнению с обычным циклическим опросом, если некоторые очереди системы имеют малую загрузку в сравнении с остальными очередями системы. Преимущество взвешенного среднего времени пребывания в системе с упорядоченным адаптивным опросом по сравнению с адаптивным опросом составляет 3,9% для аналогичной системы и 22,9% — по сравнению с системой с обычным циклическим опросом.

При увеличении интенсивности входного потока и, соответственно, при росте загрузки системы, разница величины V между системами постепенно снижается до нуля, и система с адаптивным опросом начинает вести себя как система с обычным циклическим опросом.

В разделе 4.2 приведен анализ характеристик производительности при различных порядках опроса очередей и дисциплинах их обслуживания.

С точки зрения среднего времени пребывания в системах поллинга, наименьшее среднее время пребывания в системе циклического поллинга дает исчерпывающее обслуживание.

В разделе 4.3 приведено исследование чувствительности характеристик стохастических систем с динамическим адаптивным опросом к типу функции распределения времени обслуживания и коэффициента корреляции входных потоков.

Рассмотрены системы поллинга с коррелированными входными потоками типа МАР. Отметим, что точный анализ таких систем затруднен и отсутствует в современной литературе для произвольного числа очередей. Пусть система адаптивного циклического поллинга имеет 5 очередей с шлюзовой дисциплиной обслуживания. Рассмотрим также три типа входящих потоков в очереди: детерминированные (D), простейшие (M) и МАР-потоки с параметрами $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 10$ и $\lambda_4 = \lambda_5 = 20$. Рассмотрим три варианта МАР-потоков ($МАР_i$ с коэффициентом корреляции $c_i, i = \overline{1,3}$):

$$МАР_1 : D_0 = \begin{bmatrix} -60 & 20 \\ 0 & -10 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 40 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, c_1 = 0,$$

$$МАР_2 : D_0 = \begin{bmatrix} -30 & 20 \\ 0 & -6 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 20 & 10 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}, c_1 = 0.07843,$$

$$МАР_3 : D_0 = \begin{bmatrix} -18.75 & 0.625 \\ 0.625 & -2.5 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 18.125 & 0 \\ 0 & 1.875 \end{bmatrix}, c_1 = 0.2704.$$

В каждом из случаев предполагаем, что входные потоки заявок в очереди характеризуются одними и теми же матрицами MAP , но для 4-й и 5-й очередей эти матрицы соответствующим образом масштабируются (умножаются на скаляр), чтобы получить требуемые значения λ_4 и λ_5 . Среднее время обслуживания заявки для всех очередей одинаково и равно 0,01. Рассмотрены различные типы обслуживания: детерминированное (D) время обслуживания заявки в очереди, фазового типа (PH) и марковское (MAP) обслуживание, задаваемое матрицами MAP_1 и MAP_3 , отмасштабированных соответствующим образом для сохранения одинаковых параметров. Распределение фазового типа задано вектором α и неприводимой матрицей S следующим образом:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} -10 & 0 \\ 10 & -20 \end{bmatrix}.$$

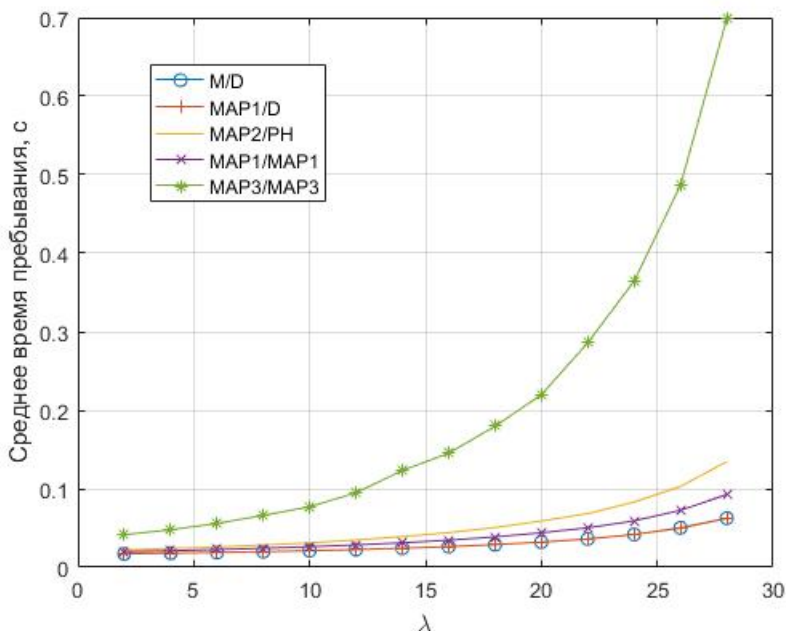


Рисунок 4 — График зависимости среднего времени пребывания в системе поллинга с шлюзовой дисциплиной при различных типах входных потоков и обслуживания

На рисунке 4 представлена зависимость среднего времени пребывания заявки в системе для различных моделей системы поллинга с 5

очередями от типа выбранной модели, степени коррелированности входных потоков и процесса обслуживания при изменении интенсивности потока заявок в очереди с номерами 4 и 5 от 2 до 34. Первый символ в надписи означает тип входного потока, второй – тип распределения времени обслуживания заявок. Заметим, что при отсутствии корреляции среднее время пребывания заявок в системах M/D и MAP_1/D практически совпадает. При ненулевой корреляции процесса обслуживания (типа MAP) среднее время пребывания заявок начинает возрастать, и в случае MAP_3 с наибольшим коэффициентом корреляции оно существенно превышает аналогичный параметр для остальных рассматриваемых моделей.

В разделе 4.4 приведена оценка эффективности использования адаптивного динамического поллинга в беспроводных компьютерных сетях IEEE 802.11 – PCF.

Проведен сравнительный численный анализ характеристик производительности беспроводной компьютерной сети для двух механизмов опроса (адаптивного и циклического опроса) с исследованием разработанного автором пакета прикладных программ расчёта систем поллинга. Длительность периода SIFS + CF-POLL является временем переключения от одной очереди к другой, а DATA, CF-ACK, DATA+CF-ACK и др. – время обслуживания. Будем полагать следующее: количество очередей $N = 4$, интенсивности входных потоков $\lambda_1 = \lambda_2 = 1/(600\mu s)$, $\lambda_3 = \lambda_4 = \lambda$ принимают значения от 1 до 200 с шагом 10, время обслуживания очередей распределено экспоненциально с параметром $\mu_1 = \mu_3 = \mu_4 = 1/(200\mu s)$, $\mu_2 = 1/(300\mu s)$, время подключения к очередям распределено экспоненциально с параметром $s_1 = s_2 = s_3 = s_4 = 1/(600\mu s)$. Результаты приведены на рисунке 5.

Из рисунка 5 следует, что выигрыш от применения адаптивного опроса в смысле среднего времени пребывания заявок в системе по сравнению с циклическим опросом составляет 15,99% в случае, когда очереди 3 и 4 имеют малую загрузку относительно первых двух очередей. При увеличении интенсивности входного потока и, соответственно, при росте загрузки системы, система с адаптивным опросом начинает вести себя как система с обычным циклическим опросом, а величина выигрыша постепенно снижается до нуля. Заметим, что в данном примере среднее время переключения сервера между очередями достаточно велико (в два раза больше, чем среднее время обслуживания одной заявки), и в этом случае выигрыш от использования адаптивного опроса ощутимее, чем например, если уменьшить среднее время переключения сервера наполовину. В последнем случае величина выигрыша уменьшается до 11,34%.

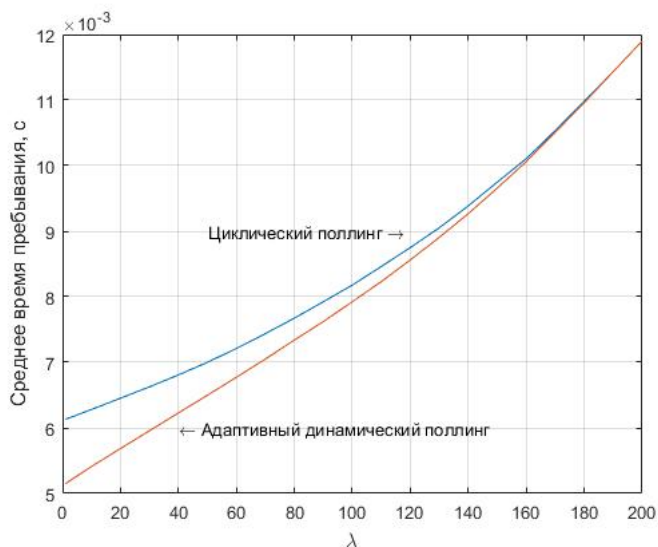


Рисунок 5 — Зависимость среднего времени пребывания от λ при циклическом и адаптивном механизме в случае большого времени переключения

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработаны методы исследования стационарных характеристик систем адаптивного поллинга с использованием аппарата вложенных марковских процессов и производящих функций;
2. Проведен сравнительный анализ различных схем адаптивного опроса и дисциплин обслуживания очередей (шлюзовая, исчерпывающая, случайная и т.д.) в системах стохастического поллинга;
3. Разработаны и исследованы модели стохастических систем динамического поллинга с коррелированными входными потоками и алгоритмы расчета их основных характеристик;
4. Проведен анализ чувствительности характеристик стохастических систем с динамическим адаптивным опросом к типу функции распределения времени обслуживания и коэффициента корреляции входных потоков;
5. Разработан комплекс программ имитационного моделирования, учитывающий особенности протоколов беспроводных сетей с централизованным управлением;
6. Разработан пакет программ по расчету характеристик широкого класса моделей систем поллинга.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ/RSCI

1. Буй, З. Т. Исследование систем поллинга с использованием имитационного моделирования / З. Т. Буй, О. В. Семёнова // Труды МФТИ. — 2018. — т. 10, № 2. — с. 95—98.

В изданиях из списка Web of Science/Scopus

2. *Semenova, O. V.* Method of Generating Functions for Performance Characteristic Analysis of the Polling Systems with Adaptive Polling and Gated Service / O. V. Semenova, D. T. Bui // Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications / ed. by A. Dudin, A. Nazarov, A. Moiseev. — Cham : Springer International Publishing, 2018. — P. 348—359.
3. Adaptive cyclic polling systems: analysis and application to the broadband wireless networks / V. Vishnevsky [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. Distributed Computer and Communication Networks. Vol. 11965 / ed. by V. M. Vishnevskiy, K. E. Samouylov, D. V. Kozyrev. — Springer, 2019. — P. 30—42.
4. Семёнова, О. В. Пакет прикладных программ для исследования систем поллинга / О. В. Семёнова, З. Т. Буй // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2020. — март. — № 50. — с. 106—113.

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Программный комплекс оценки характеристик систем стохастического поллинга : 2019614554 / В. М. Вишневский, О. В. Семёнова, З. Т. Буй ; Ф. государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) (RU). — заявл. 04.2019.

В сборниках трудов конференций

6. Семёнова, О. В. Адаптивные дисциплины опроса в системах поллинга и их имитационное моделирование / О. В. Семёнова, З. Т. Буй // Материалы всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (ИТТММ-2018, Москва, РУДН). — М.: РУДН, 2018. — с. 69—71.

7. Семёнова, О. В. Об одной системе поллинга для оценки характеристик адаптивного циклического порядка опроса / О. В. Семёнова, З. Т. Буй // Материалы 21-й Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN-2018, Москва). — М.: РУДН, 2018. — с. 13—20.
8. Семёнова, О. В. Пакет прикладных программ оценки характеристик систем стохастического поллинга / О. В. Семёнова, З. Т. Буй // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (Москва, 2019). — М.: РУДН, 2019. — с. 108—112.
9. Семёнова, О. В. Адаптивное управление порядком опроса очередей в системах поллинга и его применение в широкополосных беспроводных сетях / О. В. Семёнова, З. Т. Буй // Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, ИПУ РАН). — М.: ИПУ РАН, 2019. — с. 3007—3011.
10. Performance evaluation of the broadband wireless networks with centralized control by means of the stochastic polling systems / O. Semenova [et al.] // Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2019). — Moscow: RUDN, 2019. — P. 67—74.
11. Вишневский, В. М. Использование машинного обучения для исследования систем поллинга с коррелированным входным потоком / В. М. Вишневский, О. В. Семёнова, З. Т. Буй // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (Москва, 2020). — М.: РУДН, 2020. — с. 248—253.

БУЙ ЗУИ ТАН

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОЛЛИНГА И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
БЕСПРОВОДНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 20 экз.

Типография _____